



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

METODY PROSTOROVÉHO 3D TISKU

SPATIAL 3D PRINTING METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Skurka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Krčma

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Šimon Skurka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Krčma**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metody prostorového 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U metody 3D tisku FDM (Fused Deposition Modeling) existuje možnost opustit tisk ve vrstvách a se správným nastavením tisknout prostorové pruty a další objekty bez nutného rozdělení na vrstvy, především pomocí víceosých zařízení. Těmito metodami lze dosáhnout lepších fyzikálních a mechanických vlastností, a lepšího povrchu tištěného objektu. Jsou limitovány především geometrií stroje, obtížností generování tiskové cesty a rapidní změnou teploty materiálu.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Cílem závěrečné práce je shrnutí existujících a navržených metod prostorového tisku, zařízení a softwaru které jej umožňují a zhodnocení jejich připravenosti k průmyslové aplikaci.

Dílní cíle bakalářské práce:

- zpracovat přehled různých metod prostorového tisku,
- porovnat použitelnost různých zařízení pro metody prostorového tisku,
- zhodnocení stavu v odvětví.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

ZHAO H. M., Y. HE, J. Z. FU, a J. J. QIU. Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure. Robot. Comput. Integr. Manuf., vol. 51, no. May 2016, pp. 1–13, 2018.

DAI C., C. L. WANG, C. WU, S. LEFEBVRE, G. FANG, a Y. LIU. Support-free volume printing by multi-axis motion. ACM Trans. Graph. 2018, 37, 4, 14 pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/3197517.3201342>

MUELLER, S., S. IM, S. GUREVICH, A. TEIBRICH, L. PFISTERER, F. GUIMBRETIERE, a P. BAUDISCH. WirePrint: Fast 3D Printed Previews, In Proceedings of UIST '14, pp. 273-280. At: <https://hcie.csail.mit.edu/research/wireprint/wireprint.html>

HUANG, Yijiang, Juyong ZHANG, Xin HU, Guoxian SONG, Zhongyuan LIU, Lei YUa Ligang LIU. FrameFab: robotic fabrication of frame shapes. ACM Transactions on Graphics [online]. 2016, 35(6), 1–11. Dostupné z: doi:10.1145/2980179.2982401

JOKIC, S., P. NOVIKOV a J. LAARMAN. Mataerial [online]. 2014 [vid. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.mataerial.com/#firstPage>

HACK, N. P., W. V. LAUER, F. M. GRAMAZIO, M. KOHLER, a N. BLANK. Method of fabricating a 3-dimensional structure, mesh formwork element for fabricating a 3-dimensional structure, and method of fabricating the same. 2016. [ONLINE] Patent WO2015034438. Dostupné z: <https://patentscope.wipo.int>

EZAIR, B., S. FUHRMANN, a G. ELBER. Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3D models, CAD Comput. Aided Des., vol. 100, pp. 1–13, 2018.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o metodách prostorového 3D tisku, pomocí nichž je možné řešit řadu problémů, které se k výrobě vytlačováním nataveného termoplastu vážou. Cílem textu je tyto metody přiblížit čtenáři a seznámit ho s jejich silnými a slabými stránkami, požadavky na software, hardware a jejich přínosem pro oblast 3D tisku. První část práce se věnuje představení jednotlivých metod, obsahem druhé části je pak jejich kritické zhodnocení a seřazení dle připravenosti řešit problémy technické praxe.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, FDM, aditivní výroba, rapid prototyping, počítačem podporované projektování

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with methods of spatial 3D printing, which can solve many problems of manufacturing by fused deposition modelling. The aim of this thesis is to describe their strengths and weaknesses, requirements for hardware, software and their benefits to the world of 3D printing. Methods are introduced in the first part of the thesis, while the final evaluation is placed further.

KEYWORDS

3D printing, FDM, additive manufacturing, rapid prototyping, computer-aided design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKURKA, Šimon. *Metody prostorového 3D tisku*. Brno, 2019, 55 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Krčma.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu inženýrovi Martinu Krčmovi za pomoc a cenné rady, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Rovněž bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a zázemí při bakalářském studiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci *Metody prostorového 3D tisku* jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Martina Krčmy. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	14
2.1	Analýza problému	14
2.2	Cíl práce	14
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
3.1	Tisk nakloněných vrstev	16
3.1.1	Metoda Inclined layer printing	16
3.1.2	Slicing modelu a princip vytvoření G-code	17
3.1.3	Optimalizace úhlu sklonu vrstev a zhodnocení využitelnosti metody	18
3.2	Tisk prostorově zakřivených vrstev	19
3.2.1	Rozdíl mezi statickou a dynamickou osou z	19
3.2.2	Princip zhotovení objektu metodou CLFFF	20
3.2.3	Algoritmus vytvoření tiskové cesty	21
3.2.4	Případové studie a využití CLFFF v technické praxi	22
3.2.5	Perspektiva metody Curved Layer Fused Filament Fabrication	25
3.3	Objemové tiskové cesty	25
3.3.1	Rozložení modelu na zakřivené vrstvy	26
3.3.2	Postup fabrikace modelu	28
3.4	WirePrint, tisk drátěného modelu	30
3.5	Tisk prostorových struktur	34
3.5.1	Tisk pletivové struktury pomocí víceosého zařízení	35
3.5.2	Využití 3D tisku ve stavebnictví	36
4	DISKUZE	39
4.1	Dělení dle použitého materiálu	39
4.2	Dělení dle výrobního zařízení	40
4.3	Dělení podle typu tiskové cesty	44
4.4	Dělení podle dostupnosti softwaru	45
4.5	Použitelnost a perspektiva metod prostorového 3D tisku	46
5	ZÁVĚR	48
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49

7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	52
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	53
9	SEZNAM TABULEK	55

1 ÚVOD

Technologie 3D tisku zažívá v posledních letech nebývalý rozmach. Přestože se dostává do povědomí širší veřejnosti až nyní, její vznik se datuje do sedmdesátých až osmdesátých let minulého století, kdy byla patentována metoda stereolitografie, známá jako SLA [1].

V současné době je na trhu dostupné nepřeberné množství tiskáren ke komerčnímu či osobnímu využití, jejich cena se pohybuje od několika tisíc do několika miliónů korun. Běžně dostupné stolní tiskárny pracují převážně na principu FDM (Fused Deposition Modeling). Tisková struna je vedena extruderem do tiskové hlavy, kde je natavována a nanášena tryskou na přilnavou podložku. Tvrdnoucí tavenina pak vrstvu po vrstvě tvoří výsledný objekt [2]. Celý proces ale začíná v počítači. Vstupní data tvoří objekt vytvořený v některém z CAD (computer-aided design) programů. Ten je dále v tzv. sliceru „nařezán“ na jednotlivé vrstvy o nastavitelné výšce, které bude tiskárna tisknout. Lze si to představit jako vrstevnice na mapě. Přestože však hovoříme o „3D“ tisku, tištěný model sestává z mnoha na sebe poskládaných rovinných vrstev, a tak v této souvislosti některé zdroje hovoří o 2,5D tisku [3]. Ve sliceru je rovněž možné nastavit některé parametry, jako je tisková rychlost, teplota zahřátí materiálu a podobně. Výstupem je poté G-kód, příkaz, kterému tiskárna rozumí a podle něhož provede tisk.

3D tisk nalézá uplatnění v široké škále odvětví. Jeho předností je tvorba tvarově komplikovaných dílů, které by běžnými technologiemi založenými na odebírání materiálu byly jen těžko vyrobitelné. Velkého významu pak nabývá v oblasti rapid prototyping, umožňuje konstruktérovi či designerovi během krátké doby a s minimálními pořizovacími náklady vytvořit daný díl a udělat si tak o něm lepší představu. V medicíně najde 3D tisk uplatnění při tvorbě cenově dostupných protéz a hudební budoucnosti je tisk buněčné tkáně a orgánů [4].

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Technologie 3D tisku je však stále poměrně nová, a i přes intenzivní vývoj se k ní váže několik nedostatků. Při tisku součásti komplikovaných tvarů obsahující dutiny či převisy je nutné využívat tzv. podpory. Ty slouží, jak název napovídá, k podepření nebezpečného místa, které by se mohlo během tisku zhroutit. Jejich užití však s sebou přináší řadu negativ. Mezi ty nejcitelnější patří prodloužení tiskového času a vzhledem k tomu, že budou na konci procesu z modelu odstraněny, i zvýšení odpadního materiálu. V neposlední řadě pak v místě kontaktu podpory s modelem dochází ke vzniku reziduálních napětí, což může mít za následek deformaci povrchu [5]. Je tedy na místě hledat cestu, jak celý proces tisku podpor zefektivnit nebo se jim ideálně vyhnout úplně. Jednou z možností je nahradit klasický 3D tisk v horizontálně kladených vrstvách některou z metod prostorového 3D tisku, o kterých pojednává tato práce.

Tisková cesta běžně dostupných tiskáren je omezena na posuv ve směru souřadných os x , y a z . V současnosti však už existují i víceosá zařízení schopná operovat po mnohem složitějších tiskových cestách [6]. Při správném nastavení je možné opustit klasický tisk ve vrstvách a tisknout například prostorové pruty [7]. Mnohdy tak lze dosáhnout lepších fyzikálních a mechanických vlastností tištěného objektu oproti běžnému tisku. Zlepšení se projeví i v oblasti kvality povrchu, ten je u modelu či součásti zhotovené běžnou FDM metodou strukturovaný a bez vhodné povrchové úpravy je prakticky nemožné dosáhnout nižších drsností. Příčina tkví v samotném postupu výroby – vrstvy konečné výšky z principu nemohou vytvořit dokonale hladké přechody, a proto vznikají na povrchu modelu tzv. schody. Tento problém však u prostorového 3D tisku odpadá [8].

2.2 Cíl práce

Cílem této práce je vypracovat ucelený přehled způsobů a metod, které nastíněné problémy eliminují nebo alespoň omezují. V následujících kapitolách bude shrnuto dosavadní poznání v oblasti nekonvenčního slicingů počítačového modelu. Správně určená tisková cesta má totiž zcela zásadní vliv na výsledek tisku. Zatímco se konvenční metody omezují na slicing modelu pouze v rovinách rovnoběžných s tiskovou podložkou, metody uvedené v této práci zasahují daleko za hranice druhého rozměru a se správným nastavením umožňují tiskové hlavě pohyb po složitých trajektoriích v celém tiskovém prostoru [9].

V některých odvětvích, ve kterých je 3D tisk hojně užíván, je kladen důraz především na tiskový čas. Designéři a návrháři mnohdy potřebují mít prototyp k dispozici co nejdříve, aby ho mohli vyzkoušet a případně provést změny vedoucí ke kýženému výsledku [7]. V takových případech může být klasický tisk „vrstvu po vrstvě“ příliš zdoluhavý. Zajímavou a mnohem rychlejší alternativou je tisk prostorových prutů, o čemž bude rovněž pojednáno dále.

To a mnoho dalšího se dá se správným nastavením realizovat na běžných FDM tiskárnách [7]. V neposlední řadě se pak budu věnovat tisku pomocí různě skloněných vrstev, což nám umožňuje oprostit se od tisku podporových struktur. To má vliv nejenom na množství odpadního materiálu, ale rovněž i na kvalitu povrchu dané součásti [5].

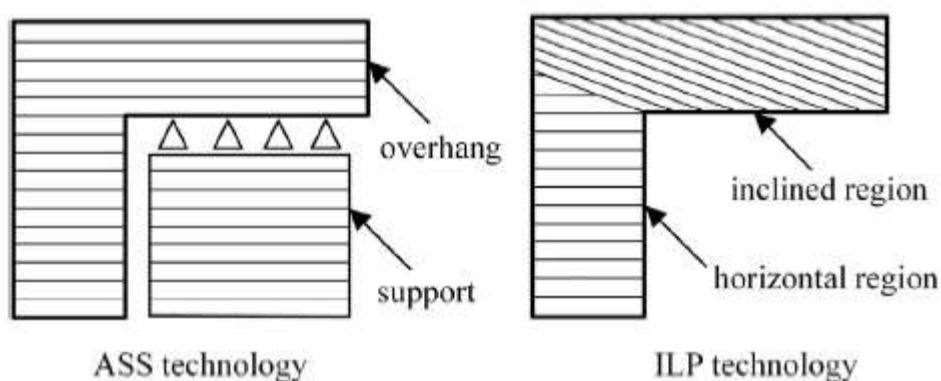
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Tisk nakloněných vrstev

Jak již bylo nastíněno výše, podpory jsou nedílnou součástí tisku tvarově komplikovaných dílů obsahujících převisy či vnitřní dutiny. Podpora je dočasně vytvořená struktura, která, jak název napovídá, má za úkol podepírat tištěné plochy a bránit tak jejich zřícení v místech, kde je úhel sklonu příliš velký, či v místech, kde by tiskárna „tiskla do vzduchu“. Zároveň slouží jako zpevnění dílů s úzkým průřezem (např. prutů) – při ochlazování naneseného filamentu dochází vlivem teplotních rozdílů ke vzniku reziduálních napětí v objemu součásti, což může vést k nežádoucím deformacím [10]. Podpory jsou však ve své podstatě odpadní materiál, protože jsou na konci celého procesu odstraněny. Jejich použití tak nepříznivě ovlivňuje cenu a čas tisku, v neposlední řadě lze pozorovat zhoršenou kvalitu v místě dotyku podpory s tištěnou plochou. Je tedy na místě hledat způsoby, jak nutnost tisku s nimi omezit či dokonce nahradit.

3.1.1 Metoda Inclined layer printing

Se zajímavým řešením přišel tým čínských výzkumníků pod vedením Hai-ming Zhao, který v roce 2017 prezentoval novou metodu 3D tisku nazvanou „Inclined layer printing“ (dále ILP) [5]. Při běžném tisku na FDM tiskárnách jsou jednotlivé vrstvy na sebe kladeny rovnoběžně s podložkou, tedy s ní svírají úhel nula stupňů [11]. Tento způsob budu dále označovat jako HLP (Horizontal layer printing). Naproti tomu při ILP metodě jsou vrstvy nakloněné a s podložkou svírají vhodný nenulový úhel, což reflektuje již samotný název, který by se do češtiny dal přeložit jako „tisk nakloněných vrstev“.

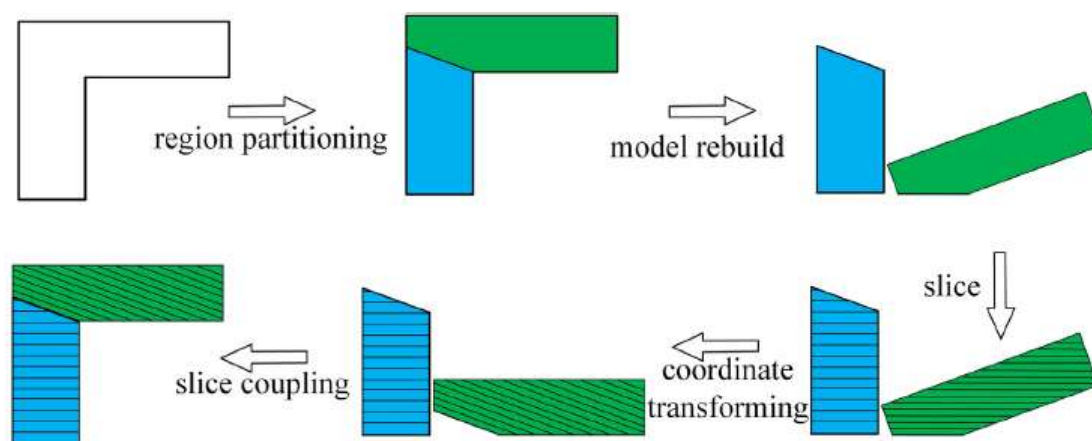


Obr. 3-1 Rozdíl mezi HLP (vlevo) a ILP (vpravo) metodou [5].

Princip metody je patrný z obr. 3-1. Zatímco vlevo je problém řešený horizontálně pokládanými vrstvami za asistence podporové struktury, vpravo byla využita ILP metoda. Při ní dojde k rozdělení objektu na oblasti. V každé jsou potom vrstvy s různým úhlem sklonu v závislosti na konkrétním případě. Díky vhodnému sklonu vrstev se tisk obejde bez použití podpor, jak by tomu bylo v běžných případech, skloněné vrstvy totiž fungují jako podpory samy sobě – každá další vytištěná vrstva je podepřena tou předchozí.

3.1.2 Slicing modelu a princip vytvoření G-code

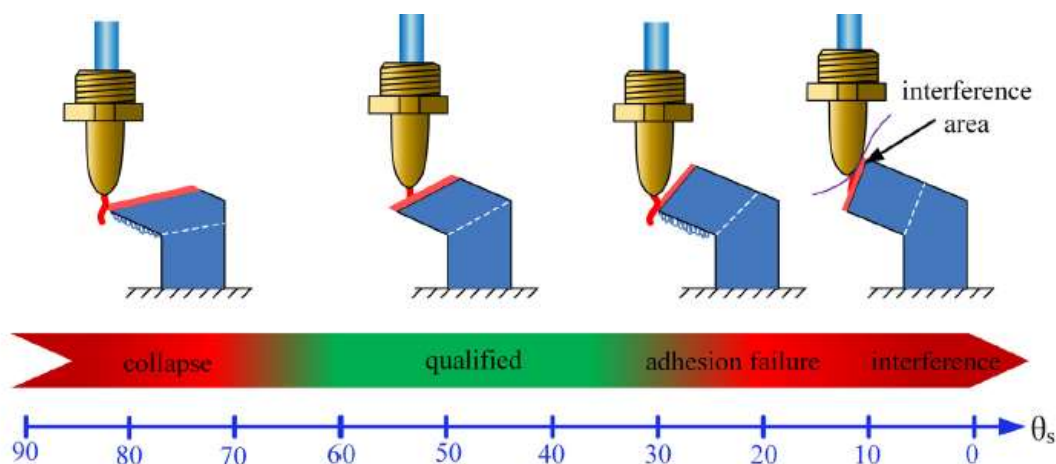
Proces rozdělení modelu na vrstvy a jejich naklonění o úhel sklonu θ probíhá v příslušném softwaru. Zhao a jeho tým použili pro svůj experiment slicer Cura (ver. 14.09 od společnosti Ultimaker), který je běžně dostupný uživatelům pro nekomerční použití [12], k „nařezání“ modelu na vrstvy a Visual Studio MFC (ver. 2015) pro naprogramování ILP systému [5]. V něm jsou vybrané rizikové oblasti, které by se bez pomocné podporové struktury neobešly, z modelu odděleny. Jedná se především o různě nakloněné části objektu. Pomocí rotace jsou otočeny do horizontální polohy a „nařezány“, stejně jako je tomu u HLP metody. Poté je však daná část druhou rotací otočena zpět do původní polohy a model je opět sestaven. Vrstvy jsou nyní vzhledem k horizontálnímu směru nakloněné o úhel sklonu θ . Výsledek je převeden do G-kódu a objekt může být vytisknut na kterékoliv stolní trojsové FDM tiskárně. Celý postup je dobře patrný z obr. 3-2:



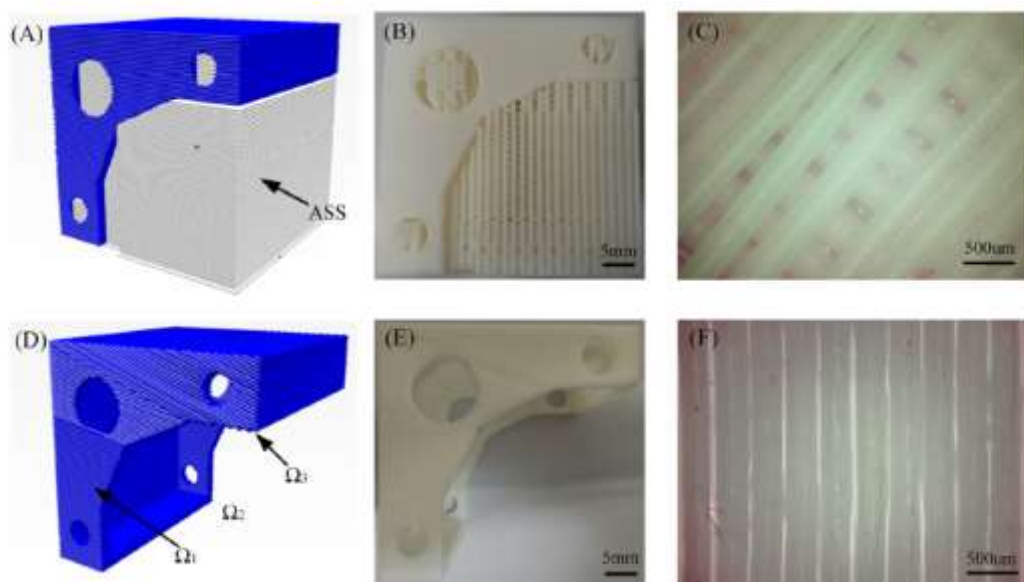
Obr. 3-2 Postup slicing modelu pomocí metody ILP [5].

3.1.3 Optimalizace úhlu sklonu vrstev a zhodnocení využitelnosti metody

Předmětem zkoumání je především úhel sklonu θ . Zhao a jeho tým provedli sérii experimentů a došli k závěru, že přijatelných výsledků je dosaženo při $40^\circ < \theta < 60^\circ$ [5]. Při vyšších úhlech může dojít ke kolapsu celé struktury a při nižších úhlech zase roztavený filament stéká z povrchu pryč. Při velmi nízkých úhlech pak může dojít ke kolizi s tryskou, viz obr. 3-3. Porovnání výsledků dosažených HLP a ILP metodou je na obr. 3-4:



Obr. 3-3 Vliv úhlu sklonu vrstvy na výsledek tisku [5]



Obr. 3-4 Srovnání modelu zhotoveného HLP (nahore) a ILP metodou (dole) [5].

Tým čínských výzkumníků si od této metody slibuje zejména vyšší efektivitu tisku za současného snížení nákladů a materiálu. Se správně zvoleným úhlem sklonu a za využití tzv. „Adaptive slicing“, tedy proměnné výšky vrstvy v objemu součásti, by mělo být možné dosahovat velmi dobré kvality povrchu součásti. Metodu ILP lze bez problémů aplikovat s využitím rozšířených a běžně dostupných FDM tiskáren a softwaru.

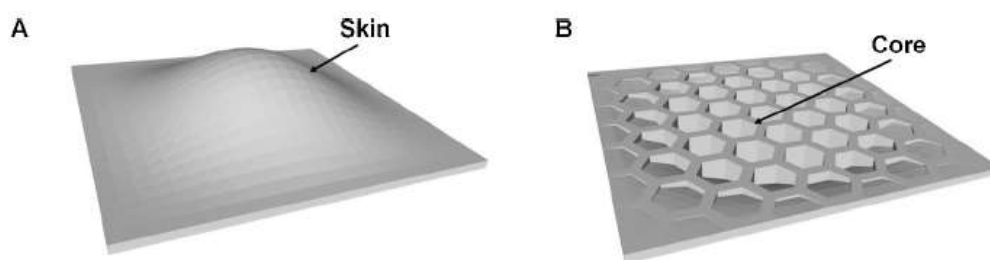
3.2 Tisk prostorově zakřivených vrstev

V současnosti je tisk vrstev v rovině rovnoběžné s podložkou, tedy se statickou hodnotou osy z , nejrozšířenějším způsobem zhotovování modelu pomocí 3D tisku, protože je nejjednodušší. Mechanické vlastnosti v celém objemu takto zhotovené součásti však nejsou stejné, záleží na směru zatěžování, rozmístění defektů vzniklých výrobou a v neposlední řadě i na orientaci modelu během výroby [13]. Ta je většinou zvolena tak, aby ho šlo vytisknout co nejjednodušeji, což se však může nepříznivě projevit právě na mechanických vlastnostech hotové součásti [14]. K porušení celistvosti pak velmi často dochází ve spojení dvou přilehlých vrstev. Statická hodnota na ose z výše uvedené problémy ještě umocňuje, kvůli ní dochází ke kumulaci drobných defektů v přilehlých vrstvách, které mohou mít ve výsledku zásadní vliv na celistvost a mechanické vlastnosti součásti [15].

3.2.1 Rozdíl mezi statickou a dynamickou osou z

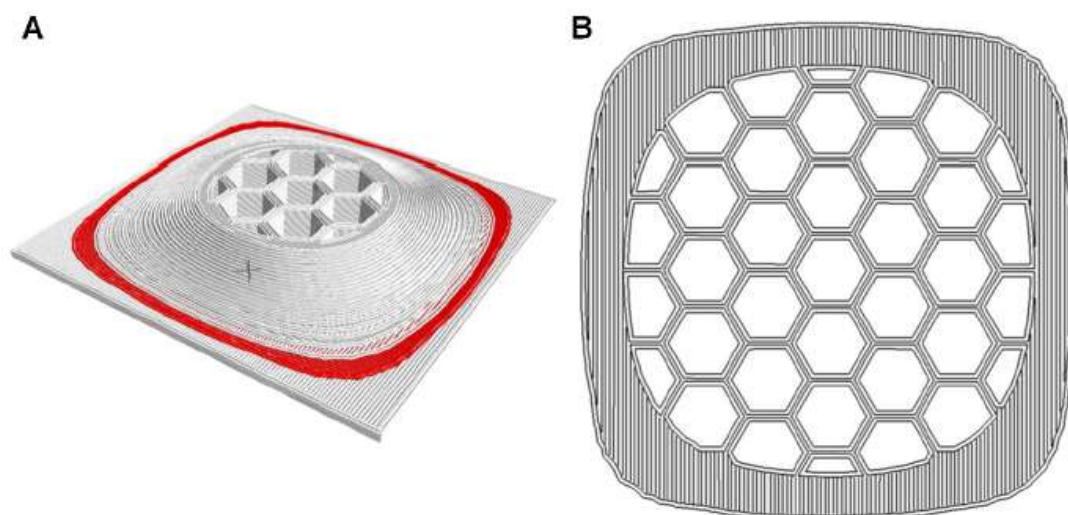
Jednou z metod využívajících dynamickou hodnotu osy z je výše zmíněná ILP metoda, přičemž dynamickou hodnotou rozumíme to, že posuv tiskové hlavy ve smyslu osy z v průběhu tisku jedné vrstvy je obecně nenulový. Vrstvy vytvořené pomocí ILP metody jsou vůči souřadnicovému systému spojenému s tiskárnou skloněné o úhel sklonu θ . Odlišný přístup reprezentuje metoda Curved layer fused filament fabrication (CLFFF), která je zaměřená na tisk prostorově zakřivených vrstev. Během tisku tisková hlava opisuje trajektorii ve tvaru prostorové křivky, posuv na ose z je tedy v průběhu tisku jedné vrstvy proměnný. Je tedy naprosto zásadní, aby posuv ve všech osách probíhal se stejnou rychlostí i zrychlením. Vertikální posuv je u běžně používaných tiskáren většinou řešen pomocí pohybového šroubu. Jeho použití je však pro metodu CLFFF naprosto nedostačující, protože rychlost vertikálního posuvu u takto řešených tiskáren může být až 30 krát menší, než rychlost posuvu horizontálního [15]. V problematice tisku prostorově zakřivených vrstev tedy naleznou uplatnění především tiskárny využívající delta kinematiku.

3.2.2 Princip zhotovení objektu metodou CLFFF



Obr. 3-5 Tištěný povrch a jeho podporová struktura [8].

Jako první je třeba rozdělit model na dvě části, viz obr. 3-5. Část „core“, kterou v této práci budu označovat jako „lešení“, slouží jako podpora pro zakřivené vrstvy. Lze ji vytisknout konvenčním způsobem se statickou hodnotou osy z. V druhé fázi jsou tištěny samotné prostorové vrstvy, které jsou nanášeny na připravené lešení, které může být na konci tisku odstraněno či ponecháno v závislosti na funkci součásti a dalších okolnostech. Obr. 3-6 znázorňuje stejnou strukturu zhotovenou standardním způsobem ve sliceru Cura [12]. Rozdíl ve kvalitě povrchu je na první pohled zřejmý, na vizualizaci součásti vyrobené standardním způsobem je zcela patrný schodovitý efekt, o kterém jsem už hovořil dříve.

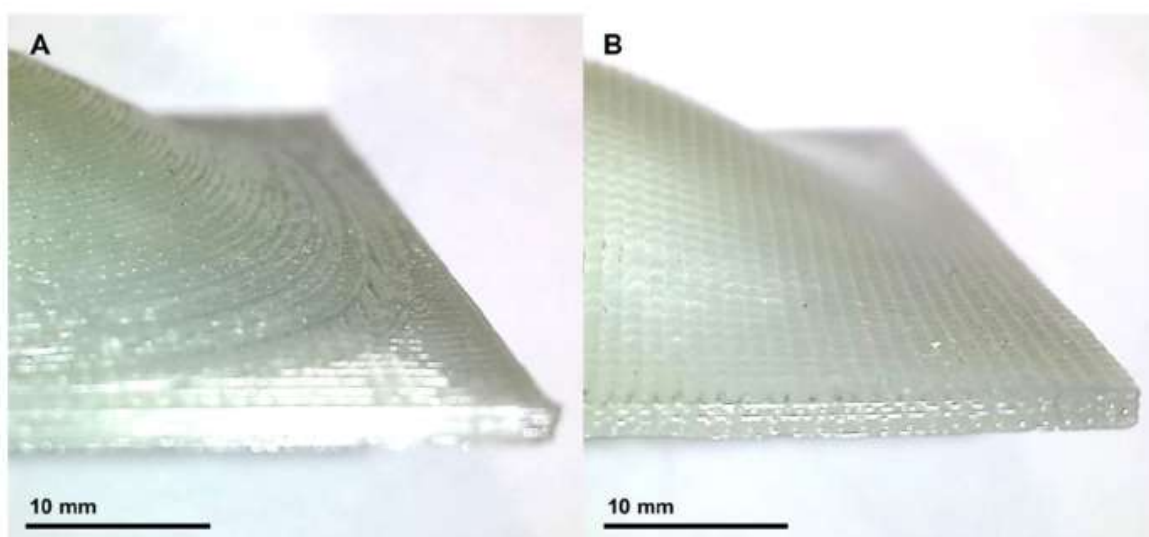


Obr. 3-6 Totožný povrch vytvořen konvenčním slicingem [8].

3.2.3 Algoritmus vytvoření tiskové cesty

Algoritmem vytvoření tiskové cesty pro metodu CLFFF se zabýval Thomas Llewellyn-Jones ve své práci „Curved layer fused filament fabrication using automated toolpath generation“. Ta, jak název napovídá, se zabývá tiskem zakřivených vrstev pomocí vhodného softwaru, přičemž tiskovou cestou je prostorová křivka [15].

Naprosto zásadní pro úspěch této metody je vytvoření vhodné tiskové cesty. To probíhá ve sliceru podle algoritmu, jenž sestává z několika kroků. Jako první je nezbytné vytvořit strukturu, která bude podkladem pro následně vytištěné zakřivené vrstvy – lešení. To je definováno soustavou vektorů zvolených tak, aby navazovaly na spodní plochu tištěného modelu a zároveň sloužily jako dočasná tisková cesta pro zakřivené vrstvy v první fázi výroby. Výhoda soustavy vektorů tkví v jednoduchosti reprodukovat opakující se struktury lešení [15]. Samotné lešení je tištěno s konvenční statickou hodnotou na ose z, protože slouží pouze jako podpora pro samotný model.



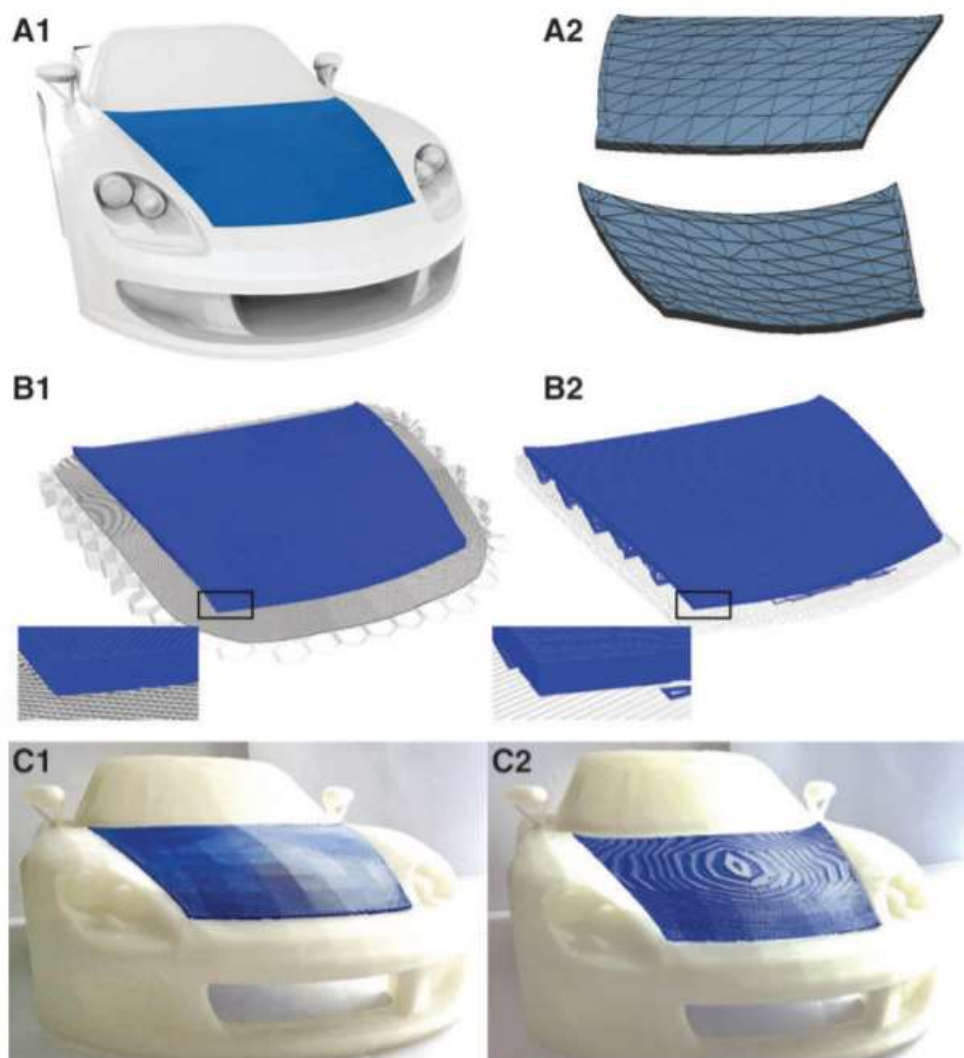
Obr. 3-7 Konvenční metoda (vlevo) a CLFFF (vpravo) [8].

Nyní následuje tisk samotného modelu. Běžně je objekt nařezán na jednotlivé vrstvy v horizontálních rovinách rovnoběžných s podložkou [11]. V tomto specifickém případě je však nezbytné řezat vrstvy vertikálně v rovinách kolmých na podložku [15]. Přitom je možné používat mezi jednotlivými vrstvami různé úhly sklonu, což se sice signifikantně projevuje na tiskovém čase, nicméně to umožňuje dosahovat lepších mechanických vlastností v daném místě součásti.

K dosažení co nejhladšího povrchu na vnějších hranách modelu je nezbytné na začátku tisku samotných vrstev vytisknout obrys tvaru dané oblasti, který je následně vyplněn materiálem. Hodnota osy z je v každém bodě získána interpolací ze vstupních dat. Po dokončení obrysu dochází k tisku samotných vrstev řezaných ve vertikální rovině. Zatímco při tisku lešení určovala hodnota na ose z maximální výšku tisku, nyní je použita k určení pozice pro tisk zakřivené vrstvy [15]. Na obr. 3-7 je vidět rozdíl mezi povrchem součásti zhotoveným konvenční metodou využívající statickou osu z (vlevo) a metodou CLFFF (vpravo).

3.2.4 Případové studie a využití CLFFF v technické praxi

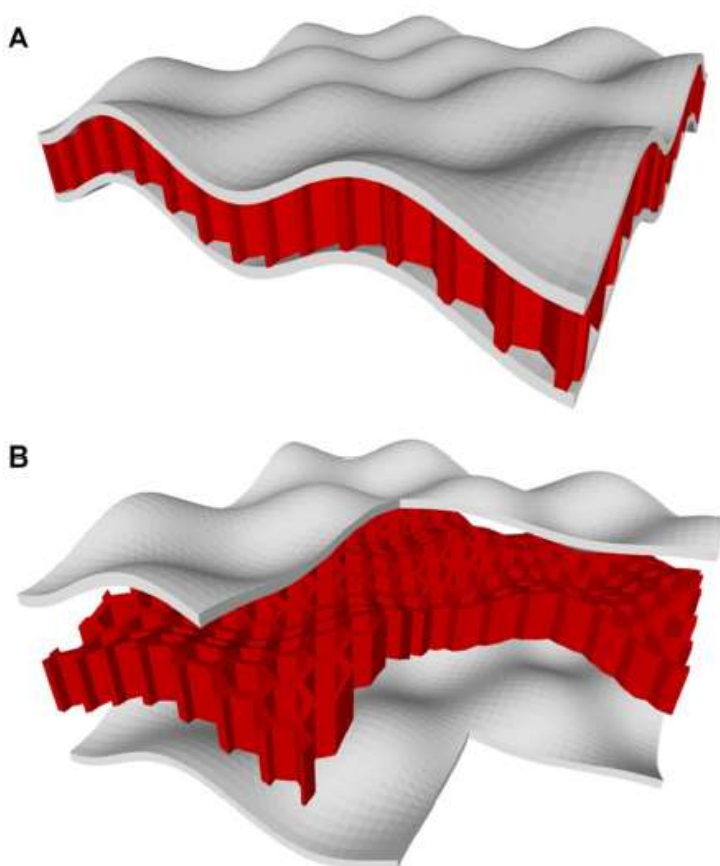
Thomas Llewellyn-Jones spolu se svým týmem provedl studii realizovatelnosti jejich algoritmu automatického generování tiskové cesty pro CLFFF metodu v technické praxi.



Obr. 3-8 Porovnání CLFFF (vlevo) a konvenční metody (vpravo) [15].

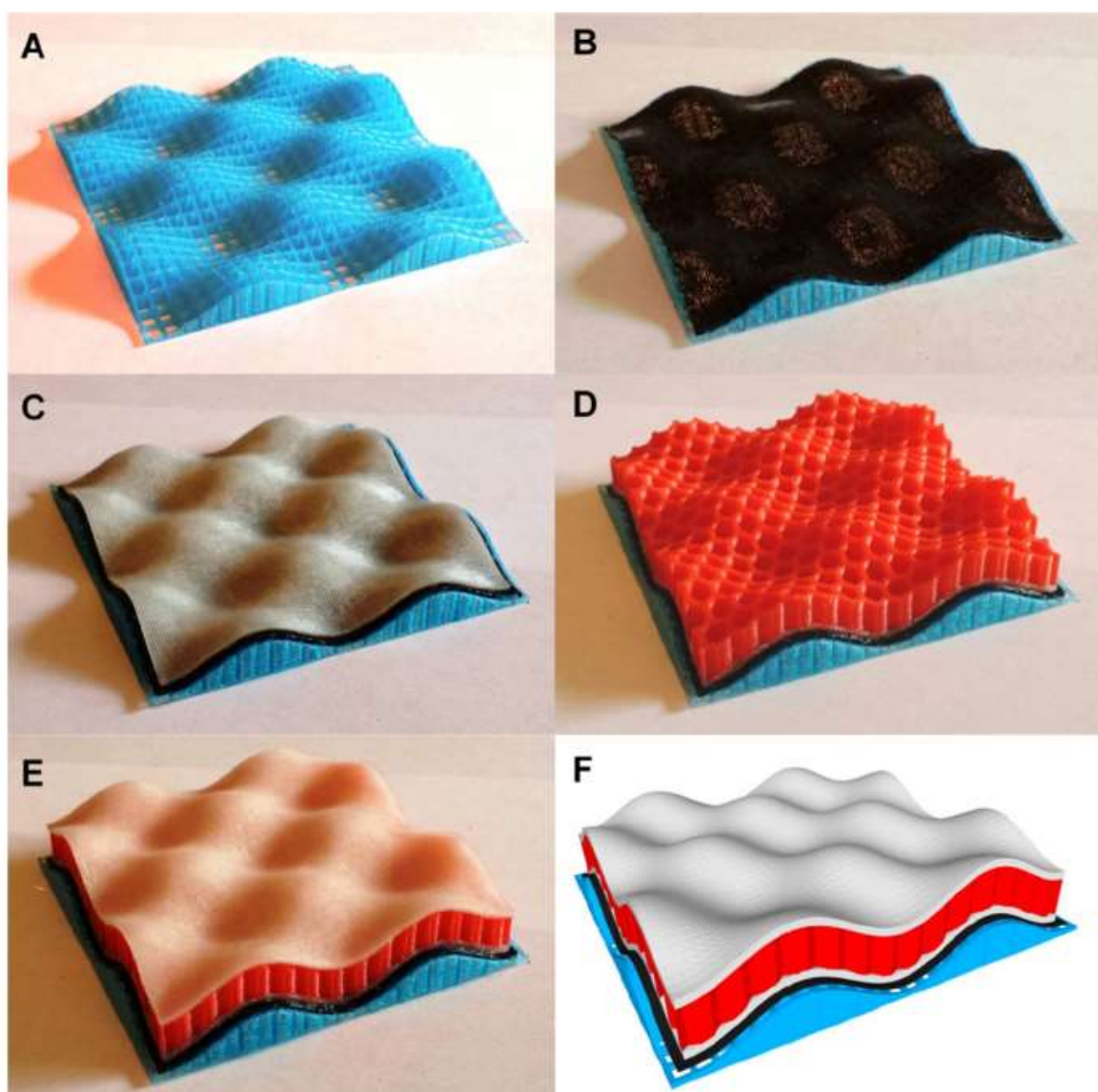
Konkrétně řešili výrobu kapoty automobilu konvenční metodou a pomocí tisku prostorových křivek. Rozdíly jsou patrné z obr. 3-8. Na A1 je zobrazen render automobilu a modře je zvýrazněná část kapoty, na A2 poté můžeme vidět povrch kapoty převedený na mřížkovou strukturu. B1 a B2 potom porovnávají tiskové cesty vytvořené CLFFF metodou (vlevo) a konvenční metodou (vpravo). C1 a C3 pak zobrazují výsledný díl zhotovený CLFFF (vlevo) a konvenční (vpravo) metodou.

Tiskem mnohem komplexnější struktury se zabývalo duo Robert J. A. Allen a Richard S. Trask. Ti ve své práci „An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot“ uvedli případovou studii tisku sendvičového panelu sestávajícího ze dvou zakřivených ploch navzájem spojených strukturou připomínající včelí plástev, viz obr 3-9. Tloušťka sinusoidní vrstvy dosahuje 2 mm, včelí plástve pak 10 mm. Celkové rozměry vytištěného panelu jsou 100 mm x 100 mm x 23, přitom tloušťka v kterémkoliv bodě panelu je 14 mm. Tisková cesta je určena křivkou $f(z) = \sin(x) * \sin(y)$ pro $[(3\pi/2 \leq x \leq 11\pi/2), (\pi/2 \leq y \leq 9\pi/2)]$, [8].



Obr. 3-9 Sendvičový panel zhotovený metodou CLFFF [8].

Samotná výroba je uskutečněna pomocí kombinace konvenční HLP metody s metodou CLFFF. Nejdříve je vytištěna podporová struktura, tzv. „raft“, která je známá z běžného 3D tisku. Ta slouží pouze jako podpora, na kterou budeme dále tisknout a je možné ji zhotovit standardním tiskem horizontálních vrstev. Protože bude na konci celého procesu odstraněna, je tedy na místě hledat způsob, jak zabránit poškození povrchu způsobeného odlamováním podpory. Jako dobrý nápad se jeví využití rozpustného materiálu – hotový objekt se po vytištění ponoří do vodní lázně, ve které se podpora rozpustí a povrch zůstane téměř nedotčen. V současné době už existuje na trhu řada tiskáren, například od společnosti Prusa Research [16], které tisk z různých druhů materiálu v rámci jednoho objektu umožňují.



Obr. 3-10 Průběh tisku pomocí metody CLFFF [8].

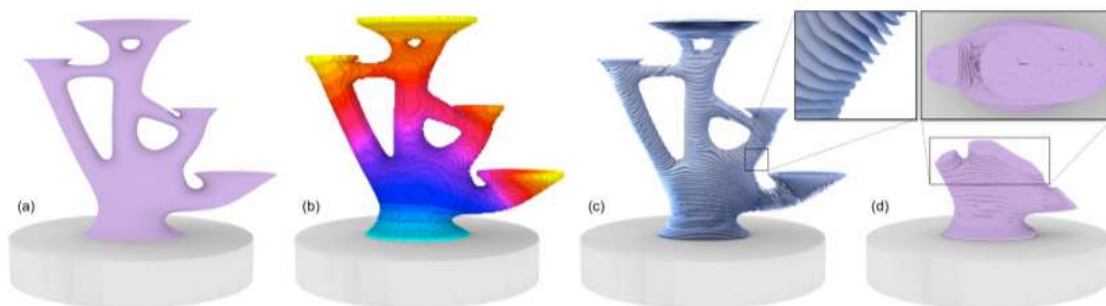
V dalším kroku je na raft nanесena další podporová vrstva, která však nyní přesně kopíruje tvar povrchu sendvičového panelu, Allen ji označuje jako „buffer layer“ a slouží jako podklad pro povrch tištěné součásti. Buffer layer, stejně jako vše ostatní, má vysoké požadavky na rychlost vertikálního posuvu, proto je doporučeno provádět tisk na tiskárně s delta kinematikou. Nyní je nanášena první vrstva povrchu, který sestává z několika vrstev, jejichž celková tloušťka bude dosahovat 2 mm. Na něm je vytištěna „včelí plástev“, kterou uzavírá horní povrch identický se spodním, ačkoliv by jeho tvar mohl být jakýkoliv. Pro výrobu byl použit běžně používaný biodegradabilní plast PLA. Celý průběh tisku dobře ilustruje obr. 3-10.

3.2.5 Perspektiva metody Curved Layer Fused Filament Fabrication

Výše uvedené příklady demonstrovaly využití CLFFF metody při tisku prostorově zakřivených vrstev. Ukázalo se, že je metoda limitována především geometrií a mechanismem, na kterém je tiskárna založena, a v neposlední řadě i schopností daného softwaru generovat vhodnou tiskovou cestu. Použití CLFFF metody slibuje především lepší mechanické vlastnosti vytištěné součásti a kvalitnější povrch. Uplatnění by mohla najít v leteckém a automobilovém průmyslu [17], kde se hojně využívá sendvičových panelů a důraz je kladen na nízké výrobní náklady součásti a současně co nejlepší mechanické vlastnosti.

3.3 Objemové tiskové cesty

Název 3D tisk dost dobře nereflektuje skutečnost, že tisk samotný probíhá na drtivě většině zařízení převážně v rovině. Chengkai Dai z Delftské univerzity v této souvislosti hovoří o 2,5D tisku [3], což lépe vystihuje fakt, že tisková cesta většiny tiskáren leží v rovině rovnoběžné s podložkou a k posuvu ve směru osy z dochází teprve až po dokončení každé vrstvy. Ve své práci „Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion“ se zabývá generováním objemových tiskových cest, které celý proces skutečně posouvají do třetího rozměru.



Obr. 3-11 Rozměrová redukce pro proces vícevrstvého 3D tisku [3].

V minulosti vzniklo již několik metod rozšiřujících pohyb tiskové hlavy o dodatečný stupeň volnosti a o některých z nich pojednává i tato práce [7], jejich použitelnost se však omezovala na malé modely jednoduchých tvarů. Jako hlavní problém se jeví výpočetní náročnost generování tiskových cest v uzavřeném objemu s ohledem na zabránění vzniku kolize mezi tryskou s již vytištěnou strukturou – jako příklad je vhodný model zobrazený na obr. 3-11 sestávající ze 186 735 objemových prvků, tzv. voxelů. Výpočet vhodné tiskové cesty podle již existujících metod může zabrat až 96 hodin. Řešení, které navrhl Dai spolu se svým týmem, tkví ve dvou po sobě jdoucích rozloženích modelu, nejdříve z objemového tělesa na soustavu povrchů a poté z povrchů na křivky [3].

3.3.1 Rozložení modelu na zakřivené vrstvy

Tisk zakřivených vrstev byl již představen v předešlé kapitole, v následujícím textu se budu zabývat rozložením objemového modelu na jednotlivé zakřivené vrstvy. Aby to bylo možné, musí model splňovat následující tři podmínky:

- 1) Model lze dostatečně aproximovat zakřivenými vrstvami
- 2) Veškeré povrchy jsou dostupné tiskové hlavě bez rizika kolize
- 3) Každá vrstva je v kontaktu se sousední a úhel sklonu je takový, aby mohl být model zhotovený bez dodatečné podporové struktury

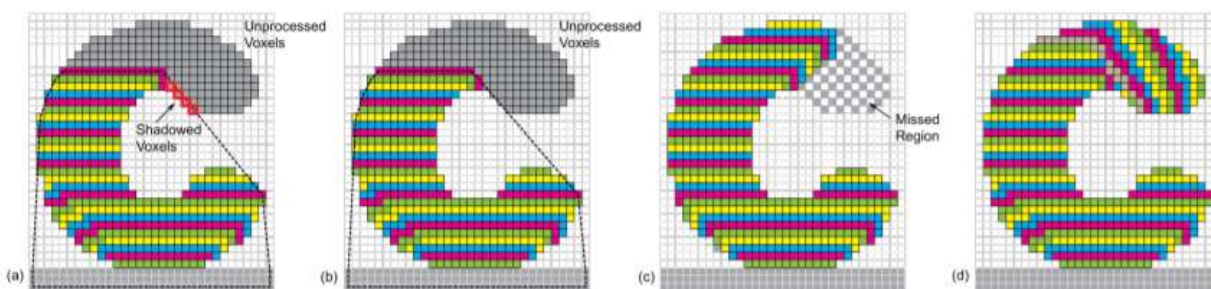
Model může být reprezentován sadou voxelů, z nichž každý je definován charakteristickým rozměrem a polohou v objemu modelu [18]. Voxely tvoří pole, ze kterého jsou extrahovány jednotlivé povrchy. Nejdříve je však nutné vypořádat se se dvěma omezeními, z nichž první říká, že každý další voxel může být přidán, teprve pokud je už jeden z jeho ASN (AM-stable-neighbors) ztuhlý, přitom za ASN považujeme takový voxel, který sousedí plochou či hranou. Druhé omezení říká, že při přidávání dalších voxelů musí být zajištěno, že nedojde ke kolizi tiskové hlavy a již existujících voxelů [3].

Vytváření pole je podmíněno určením pořadí akumulace jednotlivých voxelů, přičemž se postupuje podle následujícího algoritmu [3]:

1. Všechny voxely v kontaktu s podložkou tvořící množinu T jsou přiřazeny první vrstvě L_1 , která je zároveň brána jako okamžitá pracovní vrstva L_c .
2. Všechny voxely náležící této vrstvě jsou přidány do množiny V a jsou považovány za zpracované.
3. Konvexní slupka obklopující T a V , která reprezentuje povrch přístupný trysce, je dána jako: $C_c = C(V \cup T)$.
4. Uvažujme libovolný voxel z množiny L_c sousedící s jiným, který považujeme za ASN. Pokud sousedící voxel nepatří do C_c , přiřadíme ho do následující vrstvy L_{next} .
5. Pokud $L_{next} \neq \emptyset$, pak položit $L_c = L_{next}$ a vrátit se ke kroku 2.

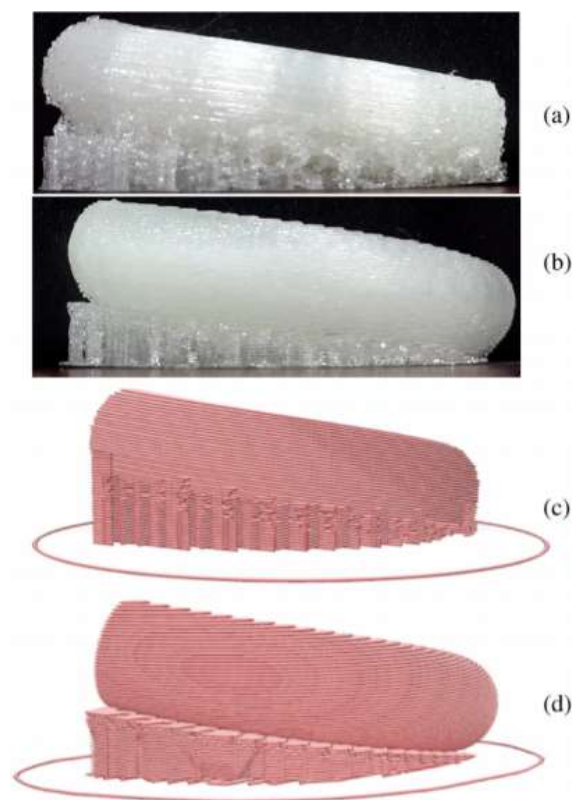
Pomocí tohoto algoritmu lze získat zakřivené vrstvy, z nichž je posléze možné vygenerovat tiskové cesty. Může se však stát, že jsou některá místa pro tiskovou hlavu nedostupná. I pro tyto případy přišel Dai s řešením, nejprve je ale nutné vysvětlit pojem „zastíněný voxel“. Voxel označujeme jako „zastíněný“, pokud je dosud nezpracován a přitom nedosažitelný tiskovou hlavou bez kolize, jak je patrné z obr. 3-12. Daiův algoritmus pro eliminaci těchto voxelů je následující [3]:

1. Zkontrolovat, zda se nějaký nezpracovaný voxel nalézá v $C_{zprac.} = C(C_{předchozí} \cup T \cup L_{next})$, pokud ano, přesunout ho do S_p , což je množina potenciálně zastíněných voxelů.
2. Pokud $S_p \neq S_c$, což je množina zastíněných voxelů, vygenerovat redukovanou množinu L' dle následujících kroků, v opačném případě už nedochází k vytváření dalších zastíněných voxelů a proces je ukončen.
3. Určit heuristickou sekvenci Q a pomocí ní přemístit voxely z L_{next} do L' .
4. Odebrat voxel v z Q a přidat ho do L' , pokud to nezvýší počet zastíněných voxelů za podmínky: $C_t = C(C_{předchozí} \cup T \cup L' \cup v)$.
5. Opakovat, dokud $Q \neq \emptyset$.



Obr. 3-12 Přístupnost voxelů tiskové hlavě [3].

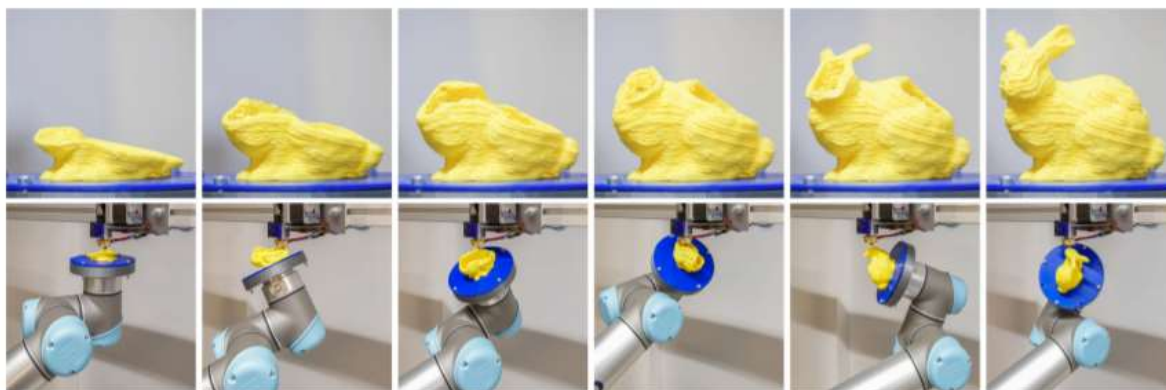
Výhoda objemových tiskových cest oproti rovinným je nejlépe viditelná na zakřivených částech modelu. Aproximujeme-li zakřivený tvar rovinnými vrstvami o určité výšce, dojde ke vzniku tzv. schodovitěho efektu, který se negativně projeví na kvalitě povrchu [9]. U objemových tiskových cest však můžeme jejich parametry přizpůsobit geometrii dané části a tisknout konvexní či konkávní tvary mnohem věrněji těm ideálním, jak je vidět na obr. 3-13:



Obr. 3-13 Srovnání kvality povrchu, objemové tiskové cesty a HLP metoda [9].

3.3.2 Postup fabrikace modelu

Pro výrobu modelu či součásti pomocí objemových tiskových cest je vhodné použít víceosé zařízení. Systém, který použil Dai se svým týmem, má s běžně užívanými tiskárnami společný princip a to, že je natavený filament tlačěn skrz trysku a tvoří jednotlivé vrstvy. Pro tento způsob fabrikace je však nezbytné uspokojit tři podmínky. Podmínka pozice se zabývá kontrolou vytlačeného filamentu, který se vlivem natavení může deformovat. Podmínka orientace je klíčová pro proces fabrikace proto, že určuje hladkost výsledného povrchu. Podmínka pózy je nezbytná, chceme-li eliminovat špatné dynamické vlastnosti víceosého zařízení.



Obr. 3-15 Systém, který pro fabrikaci použil Dai [3].

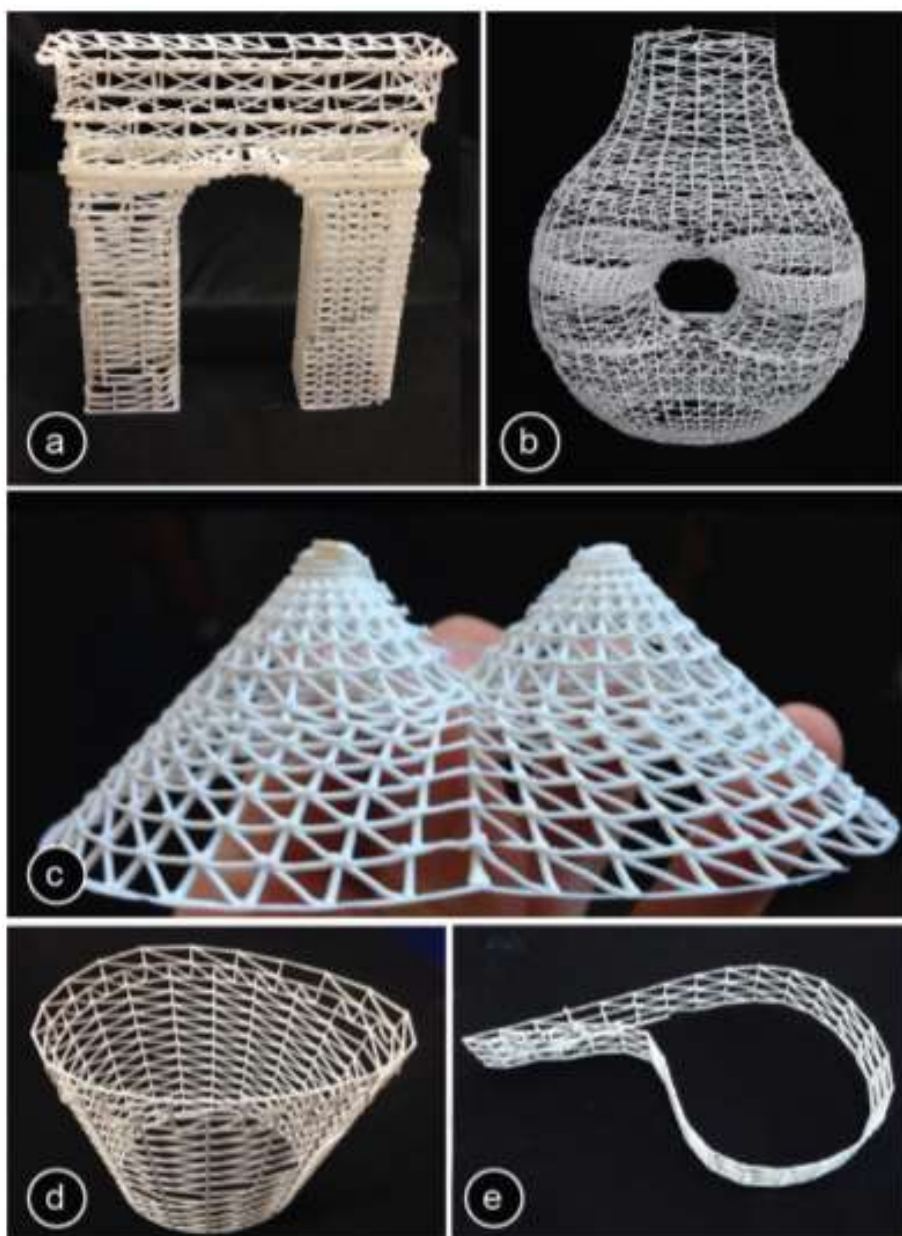
Na obr. 3-15 můžeme vidět zařízení, které k tisku použil Dai. Celý systém je vystavěn na šestiosém robotickém manipulátoru. Můžeme si povšimnout jisté odlišnosti od jiných zařízení a to, že tisková tryska zůstává během procesu fabrikace nehybnou a jediné, co se tak pohybuje, je samotný model. Takové zařízení je schopno splnit všechny uvedené podmínky pro tisk. Příklady některých vytištěných modelů jsou na obr. 3-14.



Obr. 3-14 Modely zhotovené pomocí této metody [3].

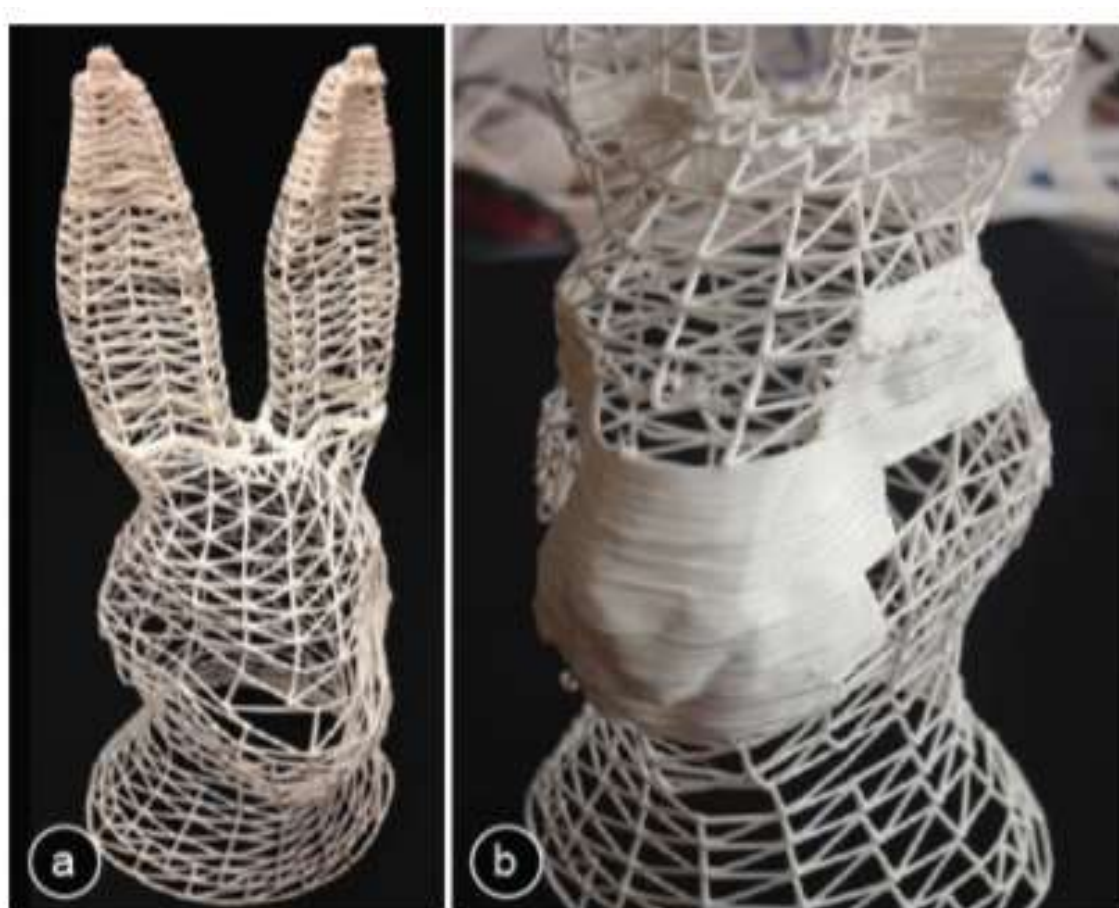
3.4 WirePrint, tisk drátěného modelu

Proces 3D tisku je ve většině případů velmi zdlouhavý, dobu tisku ovlivňují zejména velikost objektu, tisková rychlost, šířka trysky a tak podobně. Běžně se setkáváme s objekty, které se tiskly i několik desítek hodin [10]. V některých odvětvích je však stěžejní, aby byl prototyp vyroben co nejdříve – designér navrhující fén na vlasy si ho vytiskne, aby ověřil, zda jeho rukojeť pohodlně padne do ruky. Pakliže ne, změní v počítači některé parametry CAD modelu a objekt vytiskne znovu. S každou další iterací však doba celého návrhového procesu znatelně narůstá.



Obr. 3-16 Modely vytištěné metodou WirePrint [7].

V případech, kdy je objektem zájmu zejména tvar modelu, a nikoliv jeho povrch, je možné využít metodu WirePrint [6], kterou představili Stefanie Mueller a její spolupracovníci. Místo zhotovení modelu vrstvu po vrstvě, jak je běžné, tiskárna vytvoří pouze drátěný model – odtud název. Takový model si zachovává tvar předlohy, nicméně mechanické vlastnosti, stejně tak jako kvalitativní znaky povrchu, na něm zjišťovat nelze, jak je patrné z obr. 3-16.



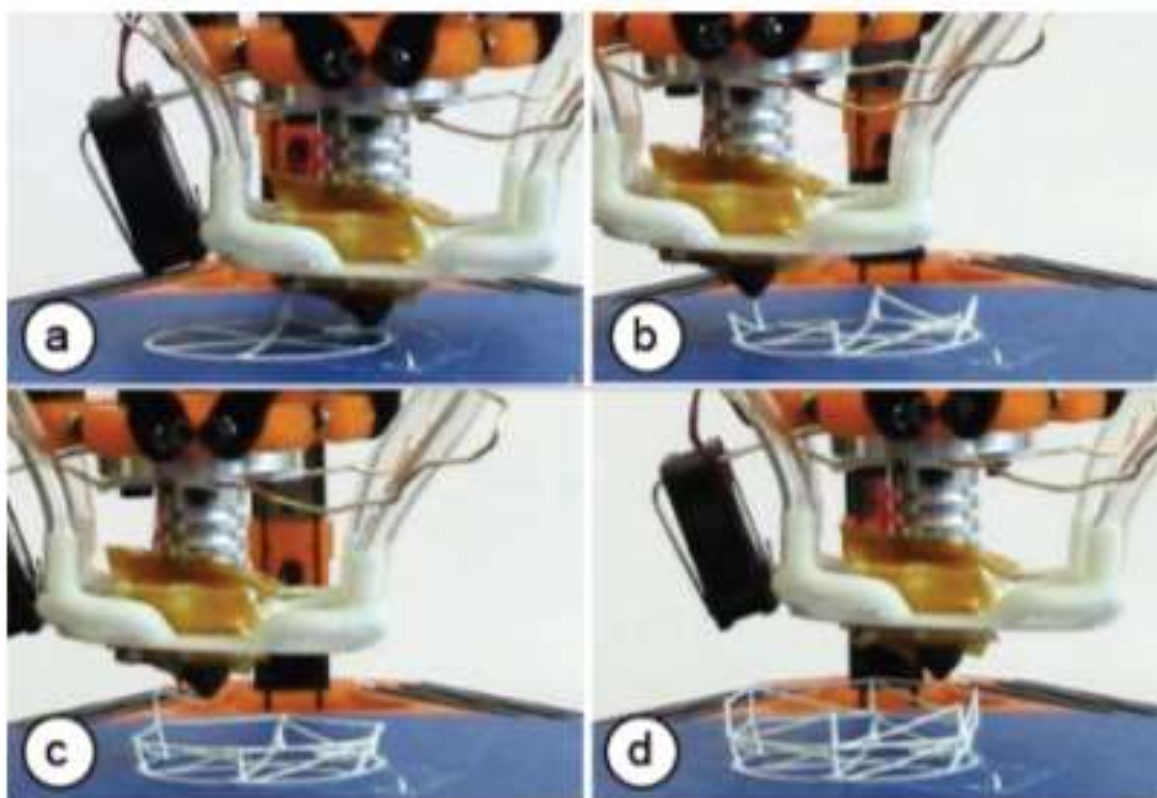
Obr. 3-17 V případě nutnosti je možné vytisknout i část povrchu modelu [7].

Pokud je však z nějakého důvodu potřeba zobrazit povrch i s jeho detaily, je možné část modelu vytisknout klasickým způsobem, jak je vidět na obr. 3-17. Výhodou tohoto přístupu je úspora materiálu a především celková úspora času, která je s pomocí této metody značná – se správným nastavením lze objekt zhotovit až desetkrát rychleji [6], než by tomu bylo v případě tisku „vrstvu po vrstvě“.

Proces tvoření drátěného modelu pomocí WirePrintu se uskutečňuje v následujících krocích:

1. Nejdříve je model rozřezán na jednotlivé vrstvy, jejichž rozmístění je voleno s ohledem na prvky geometrie modelu a minimální a maximální výšku cikcak vzoru, která je určena geometrií trysky a tiskové hlavy.

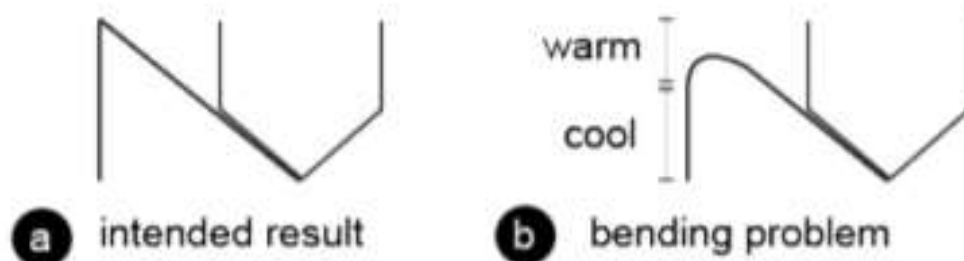
2. Nyní je z každé vrstvy vyextrahován její obrys.
3. Při generování cikcak vzoru jsou pro zvýšení stability objektu všechny vertikálně tažené pruty zarovnány do jedné roviny.
4. Teď už je drátěný model hotový z hlediska geometrie dané součásti. Ještě je však nutné doplnit veškeré geometrické modifikace dané vlastnostmi použitého materiálu a tvarem tiskové hlavy – ty zamezují případným kolizím tiskové hlavy s již vytištěným modelem.
5. Posledním krokem je vygenerování G-code.



Obr. 3-18 Detail tisku prostorových prutů [7].

Z obr. 3-18 si můžeme povšimnout, že se tisk odehrává v prostoru a místo vrstev jsou tištěny prostorové pruty – tisková hlava se ve stejný okamžik pohybuje nejenom v jedné, ale až ve třech rovinách současně. Z tohoto důvodu je zásadní zajistit, aby natavený filament vytlačený z trysky tvrdnul co nejrychleji a nedošlo k ohýbání či zborcení vytištěné struktury ještě před jeho ztuhnutím, jak je vidět na obr. 3-19. Ne méně důležité je zamezit kontaktu tiskové hlavy s již vytištěnou strukturou, která by se mohla deformovat. Toho lze docílit vhodnou geometrií tiskové hlavy.

Z toho důvodu je důležité správně určit všechny parametry tisku. Stefanie Mueller zkoumala nejrůznější tiskové strategie a došla k závěru, že nejlepších výsledků je dosaženo následujícím způsobem: Tiskárna vytáhne vertikálně orientovaný prut co nejvyšší rychlostí (v tomto případě 30 mm/s), na konci pohybu však udělá pauzu (v tomto případě 1 s), díky které má filament dostatek času ztuhnout, a protože tvrdne pod napětím, výsledná struktura dost dobře splňuje požadavky na přesnost tvarů [6].



Obr. 3-19 Deformace vytištěné struktury [7]

Tisk drátěného modelu probíhá v prostoru, má tedy zvláštní požadavky na software a geometrii tiskárny, lze ho však s menším omezením provést i s běžně dostupnými slicery a tiskárnami, většinu parametrů tisku lze nastavit například v rozšířeném sliceru Cura [9].

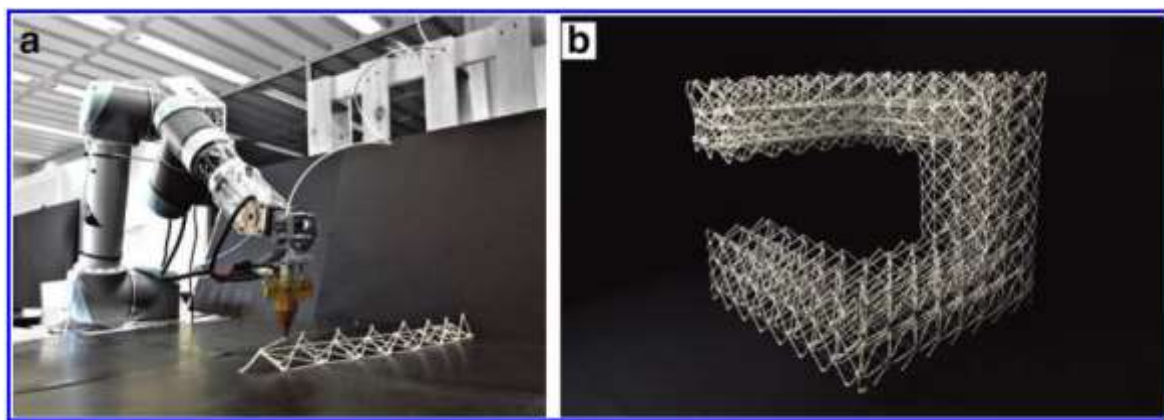
Ačkoliv lze tisknout drátěné struktury i na běžných tzv. kartézských tiskárnách (o kterých bude pojednáno dále), jejichž pohyb sestává z nezávislých posuvů v osách x, y a z, nejlepších výsledků bylo dosaženo na tiskárně Kossel mini [6], která využívá tzv. delta kinematiku. Její výhoda spočívá především v rychlosti pohybu tiskové hlavy směru osy z, která je u kartézských tiskáren operujících především v horizontální rovině xy podstatně nižší.

K ochlazení vytlačeného filamentu přispívají dva větráčky umístěné na tiskové hlavě. V neposlední řadě je nutné vhodnou geometrií zajistit, aby nedocházelo ke kolizím trysky, případně tiskové hlavy, s již vytištěnou strukturou.

3.5 Tisk prostorových struktur

3D tisk poutá pozornost inženýrů, architektů a designérů, zájem o něj vzrostl především v posledních několika letech. S využitím víceosých zařízení je možné opustit klasický tisk ve vrstvách a s použitím obyčejné trysky vytahovat prostorové pruty. Pokud bychom WirePrint, se kterým jsme se seznámili v předešlé kapitole, převedli do většího měřítka a nahradili bychom 3D tiskárnu robotickým ramenem, mohli bychom místo jednotlivých předmětů či součástí tisknout komplexní struktury, stavby, anebo dokonce domy. Přitom myšlenka stavby budov pomocí vytlačování materiálu skrz trysku není nikterak nová, datuje se již do osmdesátých let minulého století [19].

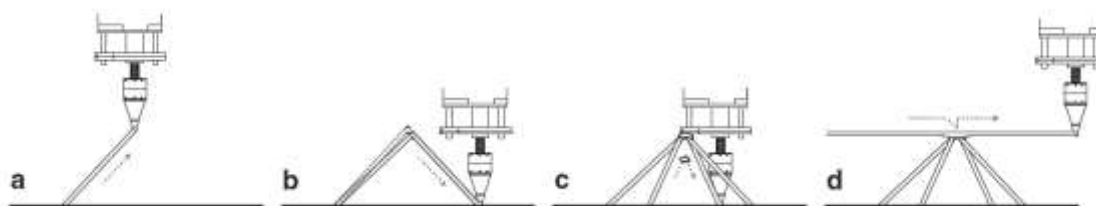
K tisku prostorové struktury je potřeba vhodné šestiosé robotické rameno (jedná se o posuvy ve směru souřadných os x , y , z a rotace okolo nich) sloužící jako manipulátor. Takovéto zařízení má totiž díky přidaným stupňům volnosti oproti stolním 3D tiskárnám větší manévrovací prostor, lépe se tak během tisku vyhne případným kolizím s již vytištěnou strukturou. Důraz je kladen zejména na nízkou váhu ramene. Na jeho konci se nachází tryska, skrz kterou je tlačén natavený filament. Jedná se o stejný princip, jako u běžných FDM tiskáren, akorát ve větším měřítku. Materiálem použitým k tisku může být i obyčejný termoplast, třeba ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), jehož výhodou jsou poměrně dobré mechanické vlastnosti [20].



Obr. 3-20 Tisk prutových struktur pomocí víceosého zařízení [19]

3.5.1 Tisk pletivové struktury pomocí víceosého zařízení

Jednu z možností tisku struktury skládající se z prostorových buněk dobře ilustruje obr. 3-21. Kritickým místem je hned první prut, který je tažen tryskou pod úhlem sklonu pohybujícím se od nuly do 90° . Tisk prvního prutu totiž probíhá „do prázdna“ – všechny ostatní na něj navazují a slouží jim tedy jako podpora. Druhý vytažený prut stabilizuje ten první a tím je první trojúhelník uzavřen. Další trojúhelník je vytažen kolmo na ten první a společně tvoří první buňku celého pletiva. Všechny buňky jsou navzájem spojené přes jejich vrcholy dalším prutem, na který je poté nanášena navazující vrstva buněk



Obr. 3-21 Princip tisku prutových soustav [19].

Výše uvedeného postupu bylo použito při stavbě instalace Iridescence Print umístěné v pařížském Palais de Tokyo, obr. 3-22. Ta zaujme především svými rozměry – na délku měří 12 metrů, na výšku pak od 1 m do 2,8 m a na šířku až půl metru. Sestává ze dvou vnějších pletiv tvořených vytištěnými buňkami, které se periodicky spojují a rozpojují. Její celková váha činí 75 kg [19].



Obr. 3-22 Iridescence Print v Palais de Tokyo [19].

K tisku byl použit filament o průměr 3 mm vyrobený z materiálu ABS. Samotná tryska měla průměr 2 mm a její teplota kolísala v rozmezí od 205°C do 215°C v závislosti na více faktorech, zejména však na vlhkosti vzduchu okolního prostředí. Teplota trysky byla řízená pomocí ovladače Arduino. Po vytlačení z trysky byl natavený filament neprodleně ochlazován proudem stlačeného vzduchu. Přitom je zajímavé, že k ochlazení filamentu stačil vzduch o pokojové teplotě a k chlazení docházelo čistě vlivem proudění.

Protože nebylo použito žádných podporových struktur, docházelo zprvu k prohýbání dlouhých prutů spojujících jednotlivé buňky. Jejich tisk byl proto realizován bez chlazení a se zvýšenou rychlostí tiskové hlavy. Vlivem pomalejšího tuhnutí a rychlejšího vytážení prutu docházelo k jeho napnutí, díky čemuž si udržel požadovaný tvar. S výše uvedeným nastavením bylo možné vytlačit až 12 mm materiálu za sekundu [19].

3.5.2 Využití 3D tisku ve stavebnictví

Přestože by se 3D tisk domů mohl jevit jako sci-fi ze vzdálené budoucnosti, ukazuje se, že to není představa úplně nereálná a již v současnosti vzniklo několik staveb pomocí vytlačování tuhnoucího materiálu [21]. Požadavek na nízkou hmotnost robotického manipulátoru s tiskovou tryskou však nejde dohromady s převážnou většinou v současnosti používaných stavebních materiálů, které bývají zpravidla příliš těžké na to, aby se o tisku s nimi dalo uvažovat. Nejpoužívanějším stavebním materiálem i nadále zůstává beton. V minulosti již proběhly experimenty s betonovými pumpami, které ho systémem potrubí přemísťovaly do předpřipravených forem, ve kterých následně tvrdnul. Vlivem vysoké výrobní ceny forem však tento postup není příliš rozšířený [22]. Robotický 3D tisk pletivové struktury však této metodě otevírá nové dveře.



Obr. 3-23 Leaking formwork, metoda využívající plastové formy plněné betonem [22].

3D tisk cementu či betonu má v současné době k dokonalosti daleko. Proces hydratace cementu v průběhu výroby, který má významný dopad na spojení a provázanost přiléhajících vrstev, je obtížně kontrolovatelný. Ke zvýšení kvality povrchu by musela být tištěná vrstva velmi nízká, což by se významně projevilo na tiskovém čase. 3D tisk samotného cementu není v současnosti připravená technologie. Jako lepší řešení se jeví tisk formy tvořené pletivovou strukturou, o které jsem hovořil výše, a její následné plnění vytlačeným betonem. Celý postup vychází z metody „Leaking formwork“ [22], která spočívá ve vyplňování plastových panelů betonem, jak je vidět na obr. 3-23. Ty poté tvoří stěnu, jejíž povrch je ručně zahlazován pro dosažení žádoucí drsnosti, viz obr. 3-24.

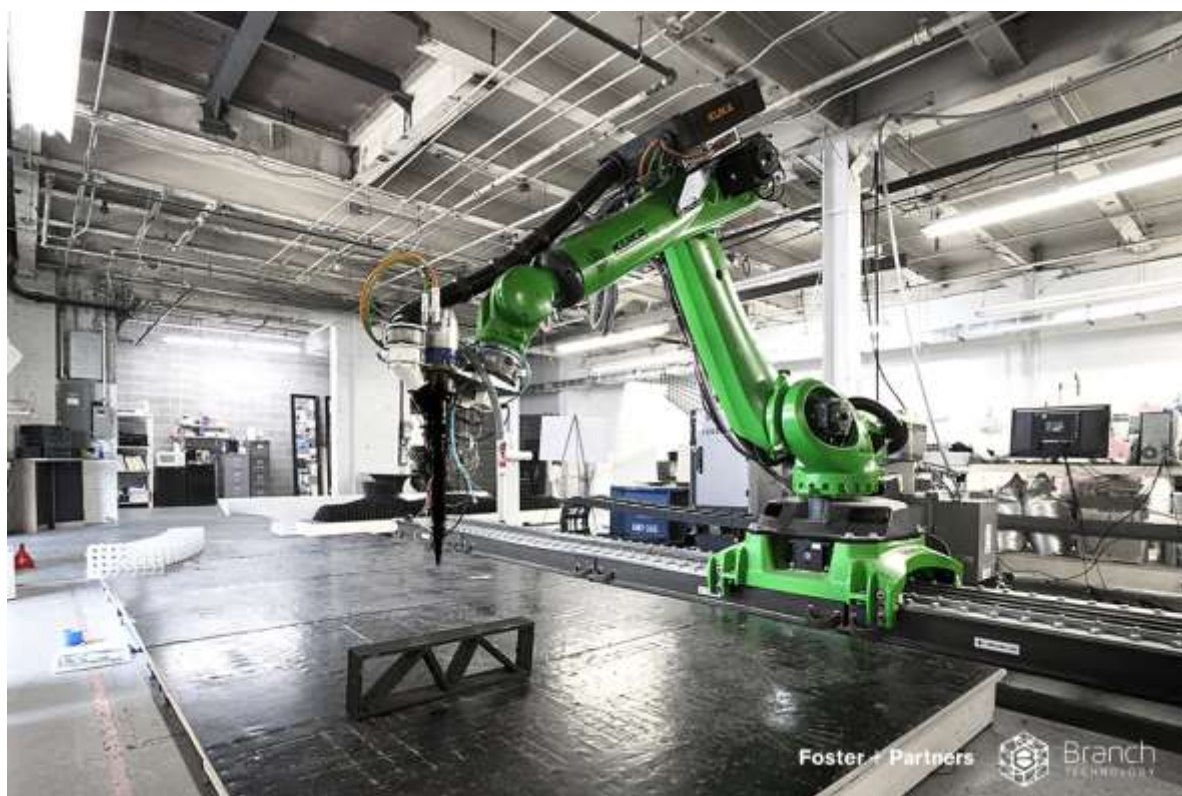


Obr. 3-24 Ruční zahlazování pro zlepšení hladkosti povrchu [22].

Realizace toho postupu je však zdlouhavá a nákladná, zahrnuje výrobu formy, přepravu, sestavení, vyplnění, rozložení a konečně úpravu hotového povrchu. To vše se však dá vyřešit nahrazením formy pletivovou strukturou, která splní stejný účel. Robotické rameno vytiskne strukturu, která v první fázi poslouží jako forma pro beton. Ve druhé fázi po jeho zatuhnutí pak jako podpora. První výhodou tohoto postupu je nepochybně kratší doba, za kterou je možné objekt zhotovit. Vzhledem k možnosti regulování hustoty buněk pletiva je možné reagovat na zatěžování v konkrétním místě a předcházet tak mezním stavům. K tomu se váže i možnost volby vhodného materiálu v závislosti na velikosti namáhání, dobrou volbou pro zatěžované konstrukce je například filament s obsahem uhlíkových vláken.

Hlavní výhodou užití tištěných struktur oproti klasickým formám je nulový odpadní materiál [23] a jejich variabilita, tedy schopnost navrhnout či optimalizovat pletivo v kterémkoliv bodě v závislosti na celé řadě proměnných.

Výhody 3D tisku, jako je možnost zhotovit téměř cokoliv a kdekoliv bez větší asistence člověka, si dobře uvědomuje i americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (NASA). Ten intenzivně zkoumá možnosti jeho využití ve stavu beztlíže, kdy v případě poruchy některé součásti by si astronauté mohli novou vytisknout přímo na palubě lodi. NASA dokonce vypsal soutěž, jejíž tématem bylo zhotovit obydlí, které by mohli v budoucnu využívat astronauté při objevování cizích planet [24].



Obr. 3-25 Víceosé zařízení KUKA s hlavicí přizpůsobenou pro 3D tisk [25].

Na druhé příčce v této soutěži se umístila společnost Foster + Partners, která ke stavbě přístřešku využila právě robotický 3D tisk. Jako manipulátor bylo použito šestiosé zařízení a jako tiskový materiál použili hybridní polymer, který sami vytvořili. Pro jeho výrobu použili materiál tvořený směsí lokálních zdrojů a recyklovaných částí dostupných z paluby rakety, přitom kladli důraz především na jeho mechanické vlastnosti. Nosník o rozměrech 644 mm na délku, 194 mm na výšku a 96,5 mm na šířku vytiskli přibližně za dvě a půl hodiny. Při jeho podrobení zátěžovému testu se ukázalo, že jeho nosnost přesahuje 6 tun, což pro jeho využití naprosto dostačuje [25].

4 DISKUZE

Metody, kterými se zabývám v této práci, jsou poměrně nové a byly testovány na modelových případech. Přestože všechny z nich lze využít pro výrobu funkčního prototypu, zůstává zde otázka, nakolik jsou připraveny řešit skutečné problémy technické praxe. Každá z metod má totiž svá specifika, silné a slabé stránky, kterými se budu zabývat v následujícím textu.

4.1 Dělení dle použitého materiálu

Nejprve je vhodné si ujasnit, z jakého materiálu je možné pomocí uvedených metod tisknout. Nejrozšířenější materiály pro 3D tisk jsou v současné době termoplasty, jako je např. PLA (kyselina polyléčná) nebo ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) [26]. Výhodou PLA je poměrně snadné zpracování a nenáročnost na přípravu tiskárny a tiskové podložky. ABS oproti PLA zase vykazuje lepší mechanické vlastnosti, pro výrobu z tohoto materiálu je však nezbytná vysoká teplota a stálost okolního prostředí, kterou většinou zajišťuje tisková komora.

Při výrobě součástí z plastu je však důležité dbát na správné ochlazování vytlačeného filamentu. Nerovnoměrné teplotní pole v objemu materiálu totiž může mít za následek vznik vnitřních pnutí či deformací [27]. Tomu lze předejít rovnoměrným ochlazováním vytlačeného filamentu větráčkem, který bývá umístěný vedle trysky na tiskové hlavě. Na trhu je v současnosti nepřeberné množství filamentů od různých výrobců, a tak se volba vhodného materiálu neomezuje pouze na ABS či PLA. Vlastnosti materiálu lze zlepšit přidáním plniv, která mohou ovlivnit chemickou odolnost, mechanické vlastnosti či stálost materiálu za zvýšené teploty [28]. Přidání kovových částic vede ke zvýšení elektrické vodivosti filamentu, reálný efekt je však spíše vizuální – vytištěná součást nabývá kovového vzhledu.

Pro tisk na SLA tiskárnách se používají nejrůznější fotopolymery, běžně označované jako pryskyřice, a pro tisk z kovového prášku se nejčastěji používá ocel nebo sloučeniny hliníku či titanu [29]. Následující tabulka uvádí přehled použitelných materiálů pro uvedené metody:

Tabulka 4-1 Materiály použitelné pro metody prostorového 3D tisku.

Materiál	ILP metoda	CLFFF metoda	Objemové tiskové cesty	WirePrint	Pletivové struktury
Termoplasty	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Fotopolymery	NE	NE	NE	NE	NE
Kov	NE	NE	ČÁSTEČNĚ	NE	NE

Je patrné, že jedinou relevantní volbou materiálu je termoplast. To se odvíjí i od samotné technologie FDM, kterou všechny výzkumné týmy pro své metody používaly. Tisk jiných než horizontálních vrstev, stejně tak jako multimateriálový tisk, je v současné době stereolitografií neproveditelný.

V kapitole „3.4.2 Postup fabrikace modelu“ jsem popsal zařízení, které pro výrobu modelu pomocí objemových tiskových cest použil Dai. To sestávalo z trysky a pohyblivé platformy, na níž se nacházel tištěný model. Podobných výsledků lze docílit i s pomocí robotického manipulátoru KUKA. Zařízení sestávající z manipulátoru a otočné platformy, jež pro laserové navařování využívá společnost MidWest Engineered Systems [30], je principiálně velmi podobné tomu, které použil Dai ve své práci a v budoucnu by mohlo mít potenciál v 3D tisku nejenom pomocí objemových tiskových cest. Jeho výhoda spočívá mimo jiné i ve variabilitě tiskové hlavy. Ta může být uzpůsobena pro klasický FDM tisk, stejně tak jako pro laserové navařování [31].

4.2 Dělení dle výrobního zařízení

Druhým kritériem, podle kterého se lze řídit při výběru vhodné metody pro konkrétní problém, je požadavek na výrobní zařízení, resp. tiskárnu. Všechny metody uvedené v této práci fungují na principu FDM, tedy vytlačování nataveného filamentu skrz trysku.



Obr. 4-1 Kartézská 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [32].

Posuv filamentu zajišťuje extruder, který může být přímo součástí tryskové hlavy nebo může být upevněn k rámu tiskárny či k podstavě tiskového ramene. V případě umístění extruderu na tiskové hlavě dochází ke zpomalení pohybu tiskové hlavy vlivem jeho váhy. Při běžném tisku v horizontálních vrstvách se váha extruderu na kvalitě tisku neprojeví a řada komerčních stolních tiskáren je řešena právě tímto způsobem. Přesuneme-li se však z tisku v rovinných vrstvách do dalšího rozměru a budeme-li tisknout prostorové struktury, u kterých je kladen větší důraz na rychlost a zrychlení tiskové hlavy, začne nás váha tiskové hlavy limitovat.

Druhým faktorem ovlivňujícím rychlost tiskové hlavy je způsob řešení posuvu ve směru osy z. V současnosti nejrozšířenějším typem uživatelům dostupných tiskáren jsou tiskárny tzv. „kartézské“. Název odkazuje na kartézský systém souřadnic – pohyb tiskové hlavy je na těchto tiskárnách realizován třemi nezávislými posuvy ve směru os x, y a z. Přitom pohyb ve směru os x a y většinou zajišťují krokové motory a řemeny, ve směru osy z je posuv řešen pomocí motoru a pohybového šroubu. Typickým reprezentantem této kategorie je například tiskárna Original Prusa i3 MK3S od české společnosti Prusa Research [32].



Obr. 4-2 Delta tiskárna DeltiQ od společnosti TriLAB [34].

Z využití pohybového šroubu vyplývá, že zrychlení ve vertikálním směru bude menší než v horizontálním. U řady metod, o kterých pojednává tato práce, je však nezbytné, aby bylo dosaženo stejného zrychlení i ve vertikálním směru, což v případě kartézských tiskáren není možné – zrychlení ve smyslu osy z je limitováno možnostmi pohybového šroubu.

Jako řešení se nabízí využití 3D tiskáren s tzv. „delta“ kinematikou, u nichž je posuv ve všech směrech ovlivněn stejnými motory a rameny. Zrychlení tiskové hlavy ve všech směrech je tedy stejně velké. Další výhodou je fakt, že tisková podložka zůstává po celou dobu tisku statická a jediné, co se pohybuje, je tisková hlava, což zmenšuje vliv případných chyb a defektů na mechanické vlastnosti tvořené součásti [33].

Mnohé týmy k realizaci experimentů skutečně upřednostnily tzv. delta tiskárny, například Stefanie Mueller pro tisk metodou WirePrint využila Kossel mini [7]. Zásadním omezením pro tisk je velikost tištěného modelu či součásti. Tiskový prostor jednotlivých tiskáren se běžně pohybuje okolo deseti tisíc centimetrů krychlových, což není mnoho. Tiskárna DeltiQ XL od společnosti TriLAB [34], která se nachází na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, poskytuje s rozměry Ø250 mm (x, y) x 500 mm (z) tiskový prostor více než dvojnásobný [34].

Pro tisk objektů, které mohou najít uplatnění jako nosné struktury ve stavebnictví, či pro Iridescence Print, je však nezbytné použít víceosý robotický manipulátor, viz obr. 4-3 [35]. Ten má oproti delta tiskárnám přidané stupně volnosti, ale i rozsah pohybu. Je ho možné umístit na pojízdnou plošinu a s její pomocí je dle výrobce možné tisknout díly o velikosti až 30 metrů v rámci jediného tiskového procesu [31]. Požadavky jednotlivých metod na výrobní zařízení jsou patrné z následující tabulky:

Tabulka 4-2 Porovnání aplikovatelnosti zařízení pro metody prostorového 3D tisku.

Výrobní zařízení	ILP metoda	CLFFF metoda	Objemové tiskové cesty	WirePrint	Pletivové struktury
Kartézské tiskárny	ANO	ČÁSTEČNĚ	NE	ČÁSTEČNĚ	NE
Delta tiskárny	ANO	ANO	ANO	ANO	NE
Robotické manipulátory	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Z tabulky je patrné, že nejuniverzálnějším výrobním zařízením je robotický manipulátor, který je však rovněž zařízením nejdražším. Jeho cena se pohybuje v rozmezí sta tisíců až milionů korun. Nejlepší poměr ceny k výkonu mají delta tiskárny, například Anycubic Kossel Linear Plus lze sehnat za v přepočtu necelých osm tisíc korun.

Jako nejméně použitelné pro metody prostorového 3D tisku pak vycházejí běžné stolní tiskárny. Tento fakt je způsoben rozložením pohybu tiskové hlavy do třech nezávislých směrů a použití pohybového šroubu pro realizaci posunů v ose z.

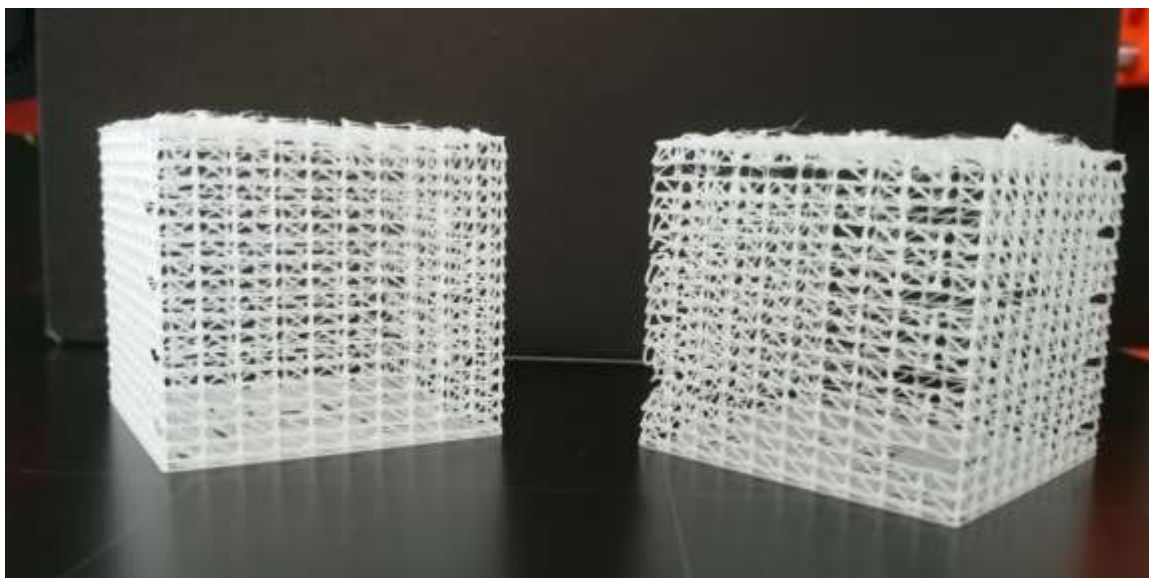
Jediná metoda, pro kterou kartézské tiskárny dosahují uspokojujících výsledků, je ILP metoda. Nicméně je nezbytné věnovat dostatečnou pozornost tomu, aby v průběhu tisku nedocházelo ke kolizi trysky či tiskové hlavy s již vytištěnými částmi modelu.



Obr. 4-3 Robotický manipulátor KUKA [35].

Do jisté míry lze kartézské tiskárny použít i pro metody WirePrint a CLFFF. V rámci ověření této hypotézy jsem pomocí WirePrintu vytiskl krychli o délce hrany 40 mm na stolní tiskárně Prusa i3 MK3. Tiskový čas byl 68 minut. První pokus nedopadl příliš uspokojivě a i přesto, že tiskárna kostku vytiskla, některé pruty byly vlivem pomalého tuhnutí filamentu prohnuté, což v mnoha případech vedlo ke zborcení celých buněk. Docházelo také ke kolizi tiskové hlavy při vytahování vertikálních prutů s již vytištěnými buňkami, kvůli čemuž byly ve výsledku buňky ve vrstvách blíže k podložce tvarově deformované ve směru osy z.

Při druhém tisku jsem se pokusil zvýšit rychlost ochlazování nanášeného filamentu přidáním externího větráku připojeného na zdroj stejnosměrného napětí. Nedošlo však k žádnému viditelnému zlepšení oproti tisku bez větráku. Ukazuje se, že pro úspěšný tisk pomocí této metody je zcela zásadní vysoké zrychlení ve vertikálním směru. Rychlé vytažení prutů má za následek vznik napětí, které pomáhá udržovat tvar až do zatuhnutí filamentu.



Obr. 4-4 Srovnání tisku metodou WirePrint s přídavným ventilátorem (vlevo) a bez něj (vpravo).

Zrychlení tiskové hlavy je zásadní i pro zbylé metody uvedené v této práci a spolu s geometrií tiskové hlavy tvoří hlavní důvody pro volbu delta tiskárny či víceosého zařízení. Pro tisk pletivových struktur je z důvodu omezeného tiskového prostoru tiskáren jedinou přijatelnou volbou víceosý robotický manipulátor.

4.3 Dělení podle typu tiskové cesty

Hlavní charakteristikou každé metody je typ vrstev, ze kterých se skládá hotový model. Každá vrstva je tvořena nanášením nataveného filamentu po tiskové cestě, kterou vygeneruje slicer. Je to tedy právě typ tiskové cesty, který odlišuje jednotlivé metody od běžného 3D tisku. Tiskové cesty využívané u jednotlivých metod jsou přehledně uspořádány v následující tabulce:

Tabulka 4-3 Srovnání jednotlivých metod dle typu tiskové cesty.

Typ tiskové cesty	ILP metoda	CLFFF metoda	Objemové tiskové cesty	WirePrint	Pletivové struktury
Rovinná	ANO	ANO	NE	NE	NE
Prostorová	NE	NE	ANO	ANO	ANO

Stejně tak jako u běžného 3D tisku, tiskové cesty ILP a CLFFF metody leží v rovině. Přesto je zde jeden zásadní rozdíl. Zatímco běžně jsou roviny rovnoběžné s tiskovou podložkou, tedy s ní svírají úhel sklonu $\theta = 0^\circ$, v případě ILP metody svírají roviny obsahující tiskové cesty s podložkou úhel sklonu v rozmezí $40^\circ < \theta < 60^\circ$.

To umožňuje efektivně podchytit riziková místa a tisknout daný model či součást bez podporových struktur. Tisková cesta u CLFFF metody leží v rovině kolmé na tiskovou podložku a obecně může mít tvar konvexních křivek. Díky tomu je možné tvar cesty přizpůsobit konkrétnímu povrchu a docílit hladkých zaoblení bez schodovitého efektu. Rovněž je možné tvar vrstev přizpůsobit namáhání dané součástí, a tím pádem zlepšit její mechanické vlastnosti. Tento způsob fabrikace již nyní nalézá uplatnění například v automobilovém průmyslu [8].

Objemové tiskové cesty, jak název napovídá, leží v tiskovém objemu tiskárny a všechny tři souřadnice x, y a z jednotlivých bodů jsou proměnné. Zatímco u CLFFF metody byla tisková cesta rovinná křivka, u této metody je tiskovou cestou libovolná prostorová křivka, a tak by se dalo říct, že jde o převedení metody CLFFF do prostoru. Metoda objemových tiskových cest je první metoda v této práci, u které můžeme hovořit o skutečně prostorovém 3D tisku.

WirePrint a tisk pletivových struktur kompletně opouští tisk ve vrstvách, objekt totiž vzniká vytahováním prutů do prostoru. Pro zajištění co nejlepších výsledků je kritické chlazení vytlačeného filamentu, aby nedocházelo k deformaci či zborcení prutu ještě před jeho zatuhnutím. To se dá řešit přidavným větrákem. Ukázalo se, že lepších výsledků je dosaženo při co nejrychlejšímu vytažení prutu a následné pauze na zatuhnutí [7].

Rychlým pohybem trysky totiž dochází ke vzniku napětí v prutu, které napomáhá držet jeho tvar do zatuhnutí. Proto je zásadní zrychlení tiskové hlavy ve všech směrech. Požadovaného zrychlení je obtížné dosáhnout na běžně používaných tiskárnách, jak jsem sám ověřil výše, a pro tisk prostorových prutů je tedy na místě použít delta tiskárnu či víceosé zařízení.

4.4 Dělení podle dostupnosti softwaru

Stejně jako typ tiskárny či zařízení i výběr vhodného softwaru má vliv na úspěch tisku. V současnosti existuje celá řada programů umožňujících vytvoření G-code a velká část z nich je uživatelům přístupná zdarma. Dostupnost programů i mimo profesionální sféru uživatelů bude mít podstatný vliv na rozšíření prostorového 3D tisku. Následující text se proto bude věnovat dostupnosti softwarů pro firmy i koncové uživatele.

Tabulka 4-4 Srovnání dle dostupnosti softwaru pro slicing modelu.

Dostupnost SW	ILP metoda	CLFFF metoda	Objemové tiskové cesty	WirePrint	Pletivové struktury
Zdarma	ANO	ANO	NE	ANO	NE
Placené	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

WirePrint a ILP metoda jsou plně realizovatelné ve sliceru Cura od společnosti Ultimaker [12]. Ten je dostupný uživatelům zdarma a v současnosti se jedná o jeden z nejpoužívanějších slicerů vůbec. K vytvoření dat pro CLFFF byl použit Autodesk Meshmixer [36], který je rovněž zdarma. Konkrétní software, pomocí kterého byly vytvořeny objemové cesty, Dai neuvádí, nicméně algoritmy zveřejněné v jeho práci by bylo možné realizovat v prostředí MatLab od společnosti MathWorks [37].

Jedná se o komerční produkt, přesto mnoho vysokých škol nabízí licence svým studentům zdarma. Pro obsluhu víceosých zařízení je třeba specializovaný software, který je většinou dodáván spolu se samotným zařízením.

4.5 Použitelnost a perspektiva metod prostorového 3D tisku

Po analýze požadavků na výrobní zařízení, tiskový materiál a softwarové vybavení můžeme přistoupit k vyhodnocení aplikovatelnosti metod v stávající situaci. Následující tabulka zahrnuje srovnání všech zkoumaných metod dle uvedených kritérií:

Tabulka 4-5 Přehled použitelnosti metod dle všech uvedených kritérií.

Přehled softwaru a hardwaru pro jednotlivé metody					
	ILP metoda	CLFFF metoda	Objemové tiskové cesty	WirePrint	Pletivové struktury
Kartézské tiskárny	ANO	ČÁSTEČNĚ	NE	ČÁSTEČNĚ	NE
Delta tiskárny	ANO	ANO	ANO	ANO	NE
Robotické manipulátory	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Volně dostupný SW	ANO	ANO	NE	ANO	NE
Placený SW	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Přehled použitelných materiálů					
Termoplasty	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Fotopolymery	NE	NE	NE	NE	NE
Kov	NE	NE	ČÁSTEČNĚ	NE	NE

Je zjevné, že nejlépe použitelnou metodou je Inclined layer printing. Je možné jí tisknout na všech typech FDM tiskáren z celé škály materiálů a pomocí běžně dostupného softwaru. Její uplatnění se však v současnosti dle mého názoru omezuje pouze na stolní 3D tisk, kde může být vítaným pomocníkem při tisku bez podpor. Naproti tomu CLFFF metoda již nyní nachází uplatnění v automobilovém průmyslu a její potenciál do budoucna je značný. Využití WirePrintu není příliš velké hlavně proto, že na prototypch vyrobených pomocí této metody nelze zkoumat mechanické vlastnosti či kvalitu povrchu. Jeho uplatnění se tedy prozatím omezuje na oblast prvotních designerských návrhů, při kterých si lze díky WirePrintu během krátké doby udělat představu o tvaru finálního produktu.

Pro CLFFF i WirePrint je použitelná celá škála běžně dostupných materiálů, jediným omezením je tedy kinematika a geometrie tiskárny. V současné době je však na trhu nepřeberné množství zařízení, které speciální požadavky těchto metod splňují.

Velkou možnost uplatnění má zejména ve stavebnictví tisk pletivových struktur. Během krátké doby je s pomocí víceosého zařízení možné vytisknout rozměrné objekty, které mohou sloužit jako forma pro stavební materiál, například beton. Po zahlazení nerovností a zatvrdnutí betonu může celá stavba fungovat jako stěna a v budoucnu se tak pomocí 3D tisku skutečně budou stavět domy.

Nejvyšší potenciál však pravděpodobně má tisk pomocí objemových cest. Jejich generace je složitá a ne každé zařízení je schopné pomocí nich tisknout. Nicméně prostorové křivky nejlépe opisují skutečný tvar tělesa, a proto mají nejlepší předpoklady pro nejkvalitnější tisk prototypů jak z pohledu kvality modelu jako takového, tak z pohledu mechanických vlastností, protože tvar vrstev může být přizpůsoben předpokládanému namáhání součástí.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o metodách prostorového 3D tisku, které, ač nejsou momentálně příliš rozšířené, skýtají v blízké budoucnosti velký potenciál. Nabízejí totiž nové způsoby řešení problémů, které se vážou k v současnosti velmi progresivnímu odvětví aditivní výroby. Metoda Inclined layer printing se zabývá tiskem modelu pomocí nakloněných vrstev, díky kterým odpadá nutnost použití podporových struktur. Tiskem zakřivených vrstev metodou CLFFF je zase možné docílit kvalitnějšího povrchu modelu, stejně tak jako jeho lepších mechanických vlastností. Objemové tiskové cesty umožňují opustit slicing v rovinách a tisknout po prostorových křivkách. Naproti tomu WirePrint kompletně opouští koncept tisku ve vrstvách a umožňuje vytahování prostorových prutů přímo z trysky. Převédeme-li WirePrint do většího měřítka a stolní tiskárnu nahradíme víceosým manipulátorem, můžeme tisknout stavby a prutové konstrukce o rozměrech i několika metrů.

Cílem práce bylo vytvořit ucelený seznam těchto metod a představit je čtenáři, protože literatura zabývající se touto problematikou v současnosti v České republice chybí. V rámci diskuze jsem shrnul požadavky jednotlivých metod na výrobní zařízení, software a materiál a zhodnotil jsem jejich připravenost řešit problémy technické praxe. Analyzoval jsem výhody a nevýhody každé z metod oproti standardnímu 3D tisku a vyzkoušel jsem tisk modelu pomocí WirePrintu.

Osobně shledávám největší potenciál v objemových tiskových cestách, fabrikace s použitím této metody má předpoklady pro výrobu prototypů a součástí s nejlepšími možnými parametry. Algoritmus pro výpočet tiskových cest však v současnosti není dokonalý a jeho zlepšování si vyžaduje pozornost inženýrů a programátorů na celém světě.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GABRIEL, San a Charles W HULL. United States Patent (19) [online]. 1984, (19). ISSN 2222222222. Dostupné z: doi:US005485919A
- [2] SOOD, Anoop K., Raj K. OHDAR a Siba S. MAHAPATRA. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research* [online]. 2012, **3**(1), 81–90. ISSN 20901232. Dostupné z: doi:10.1016/j.jare.2011.05.001
- [3] DAI, Chengkai, Charlie C. L. WANG, Chenming WU, Sylvain LEFEBVRE, Guoxin FANG a Yong-Jin LIU. Support-free volume printing by multi-axis motion. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2018, **37**(4), 1–14. ISSN 07300301. Dostupné z: doi:10.1145/3197517.3201342
- [4] HE, Yong, Guang Huai XUE a Jian Zhong FU. Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer. *Scientific Reports* [online]. 2014, **4**, 1–7. ISSN 20452322. Dostupné z: doi:10.1038/srep06973
- [5] ZHAO, Hai-ming, Yong HE, Jian-zhong FU a Jing-jiang QIU. Robotics and Computer – Integrated Manufacturing Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2018, **51**(November 2017), 1–13. ISSN 0736-5845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2017.11.011
- [6] WANG, Mingqian, Haiguang ZHANG, Qingxi HU, Di LIU a Herfried LAMMER. Research and implementation of a non-supporting 3D printing method based on 5-axis dynamic slice algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2019, **57**(January), 496–505. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2019.01.007
- [7] MUELLER, Stefanie, Sangha IM, Serafima GUREVICH, Alexander TEIBRICH, François GUIMBRETIERE a Patrick BAUDISCH. WirePrint: Fast 3D Printed Previews. *Proc. UIST*. 2014, (Figure 2), 273–280.
- [8] ALLEN, Robert J.A. a Richard S. TRASK. An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **8**, 78–87. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2015.09.001
- [9] EZAIR, Ben, Saul FUHRMANN a Gershon ELBER. Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3D models. *CAD Computer Aided Design* [online]. 2018, **100**, 1–13. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2018.02.006
- [10] WANG, Tian Ming, Jun Tong XI a Ye JIN. A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2007, **33**(11–12), 1087–1096. ISSN 02683768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-006-0556-9
- [11] MOHAN PANDEY, Pulak, N. VENKATA REDDY a Sanjay G. DHANDE. Slicing procedures in layered manufacturing: A review. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2003, **9**(5), 274–288. ISSN 13552546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540310502185

- [12] ULTIMAKER B.V. *Ultimaker Cura: Advanced 3D printing software, made accessible* [online]. [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>
- [13] AHN, Sung Hoon, Michael MONTERO, Dan ODELL, Shad ROUNDY a Paul K. WRIGHT. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS* [online]. 2002. ISBN 1355254971019. Dostupné z: [doi:10.1108/13552540210441166](https://doi.org/10.1108/13552540210441166)
- [14] KOVAN, Volkan, Gurkan ALTAN a Eyup Sabri TOPAL. Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2017, **31**(5), 2197–2201. ISSN 1738494X. Dostupné z: [doi:10.1007/s12206-017-0415-7](https://doi.org/10.1007/s12206-017-0415-7)
- [15] LLEWELLYN-JONES, Thomas, Robert ALLEN a Richard TRASK. Curved Layer Fused Filament Fabrication Using Automated Toolpath Generation. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2016, **3**(4), 236–243. ISSN 2329-7662. Dostupné z: [doi:10.1089/3dp.2016.0033](https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0033)
- [16] PRUSA RESEARCH. *Original Prusa i3 Multi Material 2.0 - Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša* [online]. [vid. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-multi-material-2-0/>
- [17] VARGHESE, Robin. Automotive 3D printing, once confined mainly to R&D, is starting to make inroads into the manufacturing process itself. So could we soon see a complete printed car? Rachel Boagey investigates. 1988.
- [18] *What is voxel? - Definition from WhatIs.com* [online]. [vid. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://whatis.techtarget.com/definition/voxel>
- [19] HELM, Volker, Jan WILLMANN, Andreas THOMA, Luka PIŠKOREC, Norman HACK, Fabio GRAMAZIO a Matthias KOHLER. Iridescence Print: Robotically Printed Lightweight Mesh Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2016, **2**(3), 117–122. ISSN 2329-7662. Dostupné z: [doi:10.1089/3dp.2015.0018](https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0018)
- [20] TORRADO PEREZ, Angel R., David A. ROBERSON a Ryan B. WICKER. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention* [online]. 2014, **14**(3), 343–353. ISSN 15477029. Dostupné z: [doi:10.1007/s11668-014-9803-9](https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9)
- [21] BUSHEY, Ryan. 3D Printer builds house in 24 hours. *Business Insider* [online]. 2014, 1–2. Dostupné z: <http://www.businessinsider.com/3d-printer-builds-house-in-24-hours-2014-1>
- [22] HACK, Norman a Willi Viktor LAUER. Mesh-mould: Robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork. *Architectural Design* [online]. 2014, **84**(3), 44–53. ISSN 15542769. Dostupné z: [doi:10.1002/ad.1753](https://doi.org/10.1002/ad.1753)
- [23] *Ai Build - Concrete Formwork* [online]. [vid. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://ai-build.com/concreteformwork.html>
- [24] HARBAUGH, Jennifer. \$100,000 Awarded in 1st Printing Stage of 3D-Printed Habitat Challenge [online]. 2017 [vid. 2019-04-10]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/phase-2-level-1-awards

- [25] *NASA Centennial Challenge — BRANCH TECHNOLOGY* [online]. [vid. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/nasa-3d-printed-habitat-challenge>
- [26] *Materiály - Prusa Research s.r.o. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online]. [vid. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [27] *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [vid. 2019-05-10]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [28] *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [vid. 2019-05-10]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [29] *3D tisk kovů DMLS SLM | Technologie 3D tisku a materiály* [online]. [vid. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
- [30] *Weld Systems / Midwest Engineered Systems, Inc. Waukesha, WI* [online]. [vid. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.mwes.com/robotic-laser-systems>
- [31] *Automatizace a aditivní výroba | KUKA AG* [online]. [vid. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/technologie/process-technologies/2018/12/3d-tisk#>
- [32] PRUSA RESEARCH. *Stavebnice 3D tiskárny Prusa i3 MK3 s LCD* [online]. [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s.html>
- [33] BELL, Charles. 3D printing with delta printers. *3D Printing with Delta Printers* [online]. 2015, 1–333. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4842-1173-1
- [34] TRILAB GROUP S.R.O. *DeltiQ – TRILAB* [online]. [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/deltiq/>
- [35] *Video: Six-axis robotic arm 3D printing glass fiber composites : CompositesWorld* [online]. [vid. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/blog/post/video-six-axis-robotic-arm-3d-printing-fiberglass-composites->
- [36] *Weblet Importer* [online]. [vid. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.meshmixer.com/>
- [37] *MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink* [online]. [vid. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>FDM</i>	Fused Deposition Modeling
<i>SLA</i>	Stereolitografie
<i>ABS</i>	Akrylonitrilbutadienstyren
<i>PLA</i>	Polylactic acid
<i>ILP</i>	Inclined layer printing
<i>HLP</i>	Horizontal layer printing
<i>CLFFF</i>	Curved layer fused filament fabrication
<i>CAD</i>	Computer-aided design
<i>ASN</i>	AM-stable-neighbors
<i>3D</i>	Trojrozměrný

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 3-1	Rozdíl mezi HLP (vlevo) a ILP (vpravo) metodou [5].	16
Obr. 3-2	Postup slicing modelu pomocí metody ILP [5].	17
Obr. 3-3	Vliv úhlu sklonu vrstvy na výsledek tisku [5]	18
Obr. 3-4	Srovnání modelu zhotoveného HLP (nahore) a ILP metodou (dole) [5].	18
Obr. 3-5	Tištěný povrch a jeho podporová struktura [8].	20
Obr. 3-6	Totožný povrch vytvořen konvenčním slicingem [8].	20
Obr. 3-7	Konvenční metoda (vlevo) a CLFFF (vpravo) [8].	21
Obr. 3-8	Porovnání CLFFF (vlevo) a konvenční metody (vpravo) [15].	22
Obr. 3-9	Sendvičový panel zhotovený metodou CLFFF [8].	23
Obr. 3-10	Průběh tisku pomocí metody CLFFF [8].	24
Obr. 3-11	Rozměrová redukce pro proces víceosého 3D tisku [3].	26
Obr. 3-12	Přístupnost voxelů tiskové hlavy [3].	27
Obr. 3-13	Srovnání kvality povrchu, objemové tiskové cesty a HLP metoda [9].	28
Obr. 3-14	Modely zhotovené pomocí této metody [3].	29
Obr. 3-15	System, který pro fabrikaci použil Dai [3].	29
Obr. 3-16	Modely vytištěné metodou WirePrint [7].	30
Obr. 3-17	V případě nutnosti je možné vytisknout i část povrchu modelu [7].	31
Obr. 3-18	Detail tisku prostorových prutů [7].	32
Obr. 3-19	Deformace vytištěné struktury [7]	33
Obr. 3-20	Tisk prutových struktur pomocí víceosého zařízení [19]	34
Obr. 3-21	Princip tisku prutových soustav [19].	35
Obr. 3-22	Iridescence Print v Palais de Tokyo [19].	35
Obr. 3-23	Leaking formwork, plastové formy plněné betonem [22].	36
Obr. 3-24	Ruční zahlazování pro zlepšení hladkosti povrchu [22].	37
Obr. 3-25	Víceosé zařízení KUKA s hlavicí přizpůsobenou pro 3D tisk [25].	38
Obr. 4-1	Kartézská 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [32].	40
Obr. 4-2	Delta tiskárna DeltiQ od společnosti TriLAB [34].	41
Obr. 4-3	Robotický manipulátor KUKA [35].	43

Obr. 4-4 Srovnání tisku metodou WirePrint s přídavným ventilátorem a bez něj 44

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 4-1	Materiály použitelné pro metody prostorového 3D tisku.	39
Tabulka 4-2	Aplikovatelnost zařízení pro metody prostorového 3D tisku.	42
Tabulka 4-3	Srovnání jednotlivých metod dle typu tiskové cesty.....	44
Tabulka 4-4	Srovnání dle dostupnosti softwaru pro slicing modelu.....	45
Tabulka 4-5	Přehled použitelnosti metod dle všech uvedených kritérií.....	46